

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**TRABAJO DE FIN DE MÁSTER**  
**Máster Universitario en Ingeniería de**  
**Telecomunicación**

**FEMTOCELDAS DE LTE**

**Ignacio Hernández Bardaji**

**FEBRERO 2016**





# **FEMTOCELDAS DE LTE**

**AUTOR: Ignacio Hernández Bardají**

**TUTOR: Bazil Taha Ahmed**

**Grupo: RFCAS**

**Departamento de Tecnología Electrónica y Comunicaciones**

**Escuela Politécnica Superior**

**Universidad Autónoma de Madrid**

**Febrero de 2016**



# Resumen

En este Trabajo de Fin de Máster se llevará a cabo el estudio del nivel de SINR y de tasa binaria proporcionados por una femtocelda que trabaje con el estándar de comunicaciones móviles LTE en un piso.

Este estudio viene motivado por la carencia que presentan las operadoras móviles a la hora de ofrecer una buena calidad de conexión en zonas cerradas como pueden ser hogares u oficinas, así como la creciente demanda por parte de los usuarios en cuanto a velocidades altas de conexión y mejoras de calidad de servicio se refiere.

Una femtocelda es una estación base de baja potencia que opera en el espectro con licencia, diseñada para dar cobertura móvil a un área pequeña. Normalmente se implementa en interiores para mejorar la cobertura móvil y aumentar la experiencia del usuario.

Primero se analizarán las características técnicas tanto de LTE como de las femtoceldas para poder llevar a cabo el estudio de manera correcta. De manera más específica, se estudiarán las modulaciones, la interfaz de radio y el tipo de codificación que usa LTE, así como la arquitectura de un sistema con femtoceldas.

Posteriormente se implementará un programa en la herramienta de desarrollo Matlab para poder calcular tanto el nivel de SINR como la tasa binaria en un piso de 6 habitaciones. Este cálculo se llevará a cabo con diferentes escenarios que permitan observar el efecto que tienen diferentes fuentes de interferencia sobre la señal de la femtocelda.

Por último se mostrarán los resultados obtenidos para los diferentes escenarios, lo cual permitirá valorar si la implementación de femtoceldas que usen LTE es una solución válida al problema anteriormente descrito.

# Abstract

In this essay it will be studied the SINR level and the bit rate given by a femtocell which works with the LTE communication mobile standard in a flat.

This study is motivated by the lack that mobile operators present when they have to offer not only a good quality connexion in enclosed areas as houses or offices, but the increasing demand by users related to high speed connexion and quality improvements of service as well.

A femtocell is a low power base station which works with license in the spectrum, designed to provide mobile coverage in a small area. It is usually placed in inner spaces to improve the mobile coverage and increase the user experience.

At first, the technical characteristics both LTE and femtocell will be analyzed to carry out the study in the correct way. More specifically, the LTE modulations, the LTE radio interface, the LTE codification type and the architecture of a femtocell system will be studied

Secondly, a code will be developed in the Matlab developing tool so as to calculate both SINR level and the binary rate in a six bedroom flat. This calculation will be applied in different environments which allow us appreciate the effect of the different interference sources on the femtocell signal.

Finally, the results of the different environments will be shown, which will let us value if the implementation of femtocells that use LTE is the valid solution for the problem previously described.

# Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin todas aquellas personas que me han estado apoyando y ayudando a lo largo de toda la carrera, por lo que son más que merecedores de mis agradecimientos.

A mi madre, que ha sido un referente, un orgullo y un ejemplo a seguir durante toda mi vida y sin la cuál no sería ni la mitad de lo que puedo ser a día de hoy. Gran parte del mérito es suyo. A mi padre y a mi hermana, apoyos incondicionales que siempre han estado ahí y que no han dudado en quererme y ayudarme cuando más lo necesitaba.

A mi tutor Bazil, por prestarme su ayuda en cualquier momento que la necesitase y estar a mi lado durante todo el transcurso de este trabajo. La consecución del TFM no habría sido posible sin él.

A mi novia Raquel, persona que ha alegrado mi día a día y con la que todo es mucho más sencillo. Siempre me ha animado y me ha hecho sentir que podía sacar el trabajo adelante, por lo que ha sido una pieza clave de este TFM.

A mis amigos de toda la vida Yeray, Joaquín y Miguel por ser la vía de escape necesaria durante todo este tiempo, mostrándome su apoyo y haciéndome reír cuando más lo he necesitado. Son como mis hermanos.

A mis compañeros y amigos de clase, en especial a Sergio Sánchez, Sergio Díaz, Alberto, Andrea, Bárbara, Tito, Marta, Ana, Roi y Edu, porque de un máster presumiblemente difícil y tedioso han hecho una época divertida y amena.

A toda mi familia en general con mención especial para mi tía Ani, cuyo amor incondicional ha sido un auténtico alivio en los momentos difíciles, y a mis abuelos, mi tío Nacho, mi tía Pili y mi tía Titi que, aunque ya no estén conmigo, seguro que se sienten orgullosos de mí. Gracias a todos de verdad.





# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	4
<b>2. TECNOLOGÍA LTE.....</b>	<b>7</b>
2.1 ¿QUÉ ES LTE?.....	7
2.2 EVOLUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS MÓVILES .....	7
2.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS .....	11
2.3.1 <i>Modulación</i> .....	12
2.3.1.1 Modulación PSK.....	13
2.3.1.2 Modulación QAM .....	14
2.3.2 <i>Interfaz de radio</i> .....	16
2.3.2.1 OFDMA y SC-FDMA .....	18
2.3.3 <i>Codificación de canal</i> .....	20
2.3.4 <i>Modulation Coding Scheme</i> .....	21
<b>3. FEMTOCELDAS .....</b>	<b>23</b>
3.1 ¿QUÉ ES UNA FEMTOCELDA? .....	23
3.2 VENTAJAS DEL USO DE FEMTOCELDAS .....	24
3.3 ARQUITECTURA Y ASPECTOS TÉCNICOS.....	25
3.4 ESTADO DEL ARTE .....	28
<b>4. INTERFERENCIAS Y TASA BINARIA .....</b>	<b>31</b>
4.1 MODELOS DE PROPAGACIÓN .....	31
4.1.1 <i>Modelo de propagación en espacio libre</i> .....	32
4.1.2 <i>Modelo multipared</i> .....	32
4.1.3 <i>Modelo Stanford University Interim (SUI)</i> .....	33
4.2 ANÁLISIS DE INTERFERENCIAS .....	36
4.2.1 <i>Interferencias intra-edificio</i> .....	36
4.2.2 <i>Interferencias inter-edificios</i> .....	37
4.2.3 <i>Interferencias edificio-macrocela</i> .....	38
4.3 SNR.....	38
4.4 SINR.....	39

4.5 FÓRMULA DE FRIIS .....	40
4.6 TASA BINARIA .....	41
4.7 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN .....	44
4.8 GANANCIA DE LA ANTENA TRANSMISORA DE LA MACROCELDA Y POTENCIA DE RUIDO .....	46
4.9 EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA DE ANÁLISIS .....	47
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
5.1 ESCENARIOS.....	57
5.2 EDIFICIO ÚNICO .....	59
5.2.1 Planta superior.....	59
5.2.2 Planta del medio .....	62
5.2.3 Planta inferior .....	63
5.3 TRES EDIFICIOS, EDIFICIO CENTRAL .....	64
5.3.1 Planta superior.....	64
5.3.2 Planta del medio .....	65
5.3.3 Planta inferior .....	66
5.4 TRES EDIFICIOS, EDIFICIO LATERAL.....	67
5.4.1 Planta superior.....	67
5.4.2 Planta del medio .....	68
5.4.3 Planta inferior .....	69
5.5 TRES EDIFICIOS Y MACROCELDA, EDIFICIO CENTRAL.....	70
5.5.1 Macrocelda a 10 metros .....	70
5.5.1.1 Planta superior .....	70
5.5.1.2 Planta del medio.....	73
5.5.1.3 Planta inferior.....	74
5.5.2 Macrocelda a 50 metros .....	75
5.5.2.1 Planta superior .....	75
5.5.2.2 Planta del medio.....	76
5.5.2.3 Planta inferior.....	77
5.5.3 Macrocelda a 100 metros .....	78
5.5.3.1 Planta superior .....	78
5.5.3.2 Planta del medio.....	79
5.5.3.3 Planta inferior.....	80
5.5.4 Macrocelda a 250 metros .....	81
5.5.4.1 Planta superior .....	81
5.5.4.2 Planta del medio.....	82
5.5.4.3 Planta inferior.....	83
5.5.5 Macrocelda a 500 metros .....	84

5.5.5.1 Planta superior .....	84
5.5.5.2 Planta del medio.....	85
5.5.5.3 Planta inferior.....	86
5.6 TRES EDIFICIOS Y MACROCELDA, EDIFICIO LATERAL .....	87
5.6.1 <i>Macrocela a 10 metros</i> .....	87
5.6.1.1 Planta superior .....	87
5.6.1.2 Planta del medio.....	88
5.6.1.3 Planta inferior.....	89
5.6.2 <i>Macrocela a 50 metros</i> .....	90
5.6.2.1 Planta superior .....	90
5.6.2.2 Planta del medio.....	91
5.6.2.3 Planta inferior.....	92
5.6.3 <i>Macrocela a 100 metros</i> .....	93
5.6.3.1 Planta superior .....	93
5.6.3.2 Planta del medio.....	94
5.6.3.3 Planta inferior.....	95
5.6.4 <i>Macrocela a 250 metros</i> .....	96
5.6.4.1 Planta superior .....	96
5.6.4.2 Planta del medio.....	97
5.6.4.3 Planta inferior.....	98
5.6.5 <i>Macrocela a 500 metros</i> .....	99
5.6.5.1 Planta superior .....	99
5.6.5.2 Planta del medio.....	100
5.6.5.3 Planta inferior.....	101
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>103</b>
6.1 TRABAJO FUTURO .....	105
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXO I: LISTA DE ACRÓNIMOS .....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO II: FUNCIONES IMPLEMENTADAS .....</b>	<b>111</b>
A. <i>DIMENSION_PISO</i> .....	111
B. <i>L_TOTALES</i> .....	111
C. <i>DBToNAT Y NATToDB</i> .....	112
D. <i>L_MACROCELDA</i> .....	112



# Índice de figuras

FIGURA 1: FORMAS DE ONDA EN PSK .....	13
FIGURA 2: MODULACIÓN BPSK .....	14
FIGURA 3: MODULACIÓN QPSK.....	14
FIGURA 4: MODULACIÓN 16-QAM .....	15
FIGURA 5: MODULACIÓN 64-QAM .....	15
FIGURA 6: MULTIPLEXACIONES TDMA, FDMA Y CDMA .....	17
FIGURA 7: MULTIPLEXACIÓN OFDMA.....	19
FIGURA 8: DIFERENCIAS ENTRE OFDMA Y SC-DMA .....	19
FIGURA 9: ESQUEMA DE UN TURBO-CODIFICADOR .....	21
FIGURA 10: IMPLEMENTACIÓN DE UNA FEMTOCELDA .....	23
FIGURA 10: ARQUITECTURA DE CONEXIONES DE UNA FEMTOCELDA.....	26
FIGURA 11: ESQUEMA DE INTERFERENCIAS INTRA-EDIFICIO.....	36
FIGURA 12: ESQUEMA DE INTERFERENCIAS INTER-EDIFICIO .....	37
FIGURA 13: ESQUEMA DE INTERFERENCIAS MACROCELDA-EDIFICIO .....	38
FIGURA 14: PLANO DEL PISO.....	44
FIGURA 15: GANANCIA DE LA ANTENA TX DE LA FEMTOCELDA.....	52
FIGURA 16: SINR, ESCENARIO A.1 .....	59
FIGURA 17: BIT RATE, ESCENARIO A.1 .....	60
FIGURA 18: CDF SINR, ESCENARIO A.1 .....	61
FIGURA 19: CDF BIT RATE, ESCENARIO A.1 .....	61
FIGURA 20: SINR, ESCENARIO A.2 .....	62
FIGURA 21: BIT RATE, ESCENARIO A.2 .....	62
FIGURA 22: CDF SINR, ESCENARIO A.2 .....	62
FIGURA 23: CDF BIT RATE, ESCENARIO A.2 .....	62
FIGURA 24: SINR, ESCENARIO A.3 .....	63

FIGURA 25: BIT RATE, ESCENARIO A.3 .....	63
FIGURA 26: CDF SINR, ESCENARIO A.3 .....	63
FIGURA 27: CDF BIT RATE, ESCENARIO A.3 .....	63
FIGURA 28: SINR, ESCENARIO B.1.....	64
FIGURA 29: BIT RATE, ESCENARIO B.1 .....	64
FIGURA 30: CDF SINR, ESCENARIO B.1.....	64
FIGURA 31: CDF BIT RATE, ESCENARIO B.1 .....	64
FIGURA 32: SINR, ESCENARIO B.2.....	65
FIGURA 33: BIT RATE, ESCENARIO B.2 .....	65
FIGURA 34: CDF SINR, ESCENARIO B.2.....	65
FIGURA 35: CDF BIT RATE, ESCENARIO B.2 .....	65
FIGURA 36: SINR, ESCENARIO B.3.....	66
FIGURA 37: BIT RATE, ESCENARIO B.3 .....	66
FIGURA 38: CDF SINR, ESCENARIO B.3.....	66
FIGURA 39: CDF BIT RATE, ESCENARIO B.3 .....	66
FIGURA 40: SINR, ESCENARIO C.1.....	67
FIGURA 41: BIT RATE, ESCENARIO C.1 .....	67
FIGURA 42: CDF SINR, ESCENARIO C.1.....	67
FIGURA 43: CDF BIT RATE, ESCENARIO C.1 .....	67
FIGURA 44: SINR, ESCENARIO C.2.....	68
FIGURA 45: BIT RATE, ESCENARIO C.2 .....	68
FIGURA 46: CDF SINR, ESCENARIO C.2.....	68
FIGURA 47: CDF BIT RATE, ESCENARIO C.2 .....	68
FIGURA 48: SINR, ESCENARIO C.3.....	69
FIGURA 49: BIT RATE, ESCENARIO C.3 .....	69
FIGURA 50: CDF SINR, ESCENARIO C.3.....	69
FIGURA 51: CDF BIT RATE, ESCENARIO C.3 .....	69

FIGURA 52: SINR, ESCENARIO D.1_10.....	70
FIGURA 53: BIT RATE, ESCENARIO D.1_10 .....	71
FIGURA 54: CDF SINR, ESCENARIO D.1_10.....	72
FIGURA 55: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.1_10 .....	72
FIGURA 56: SINR, ESCENARIO D.2_10.....	73
FIGURA 57: BIT RATE, ESCENARIO D.2_10 .....	73
FIGURA 58: CDF SINR, ESCENARIO D.2_10.....	73
FIGURA 59: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.2_10 .....	73
FIGURA 60: SINR, ESCENARIO D.3_10.....	74
FIGURA 61: BIT RATE, ESCENARIO D.3_10 .....	74
FIGURA 62: CDF SINR, ESCENARIO D.3_10.....	74
FIGURA 63: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.3_10 .....	74
FIGURA 64: SINR, ESCENARIO D.1_50.....	75
FIGURA 65: BIT RATE, ESCENARIO D.1_50 .....	75
FIGURA 66: CDF SINR, ESCENARIO D.1_50.....	75
FIGURA 67: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.1_50 .....	75
FIGURA 68: SINR, ESCENARIO D.2_50.....	76
FIGURA 69: BIT RATE, ESCENARIO D.2_50 .....	76
FIGURA 70: CDF SINR, ESCENARIO D.2_50.....	76
FIGURA 71: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.2_50 .....	76
FIGURA 72: SINR, ESCENARIO D.3_50.....	77
FIGURA 73: BIT RATE, ESCENARIO D.3_50 .....	77
FIGURA 74: CDF SINR, ESCENARIO D.3_50.....	77
FIGURA 75: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.3_50 .....	77
FIGURA 76: SINR, ESCENARIO D.1_100.....	78
FIGURA 77: BIT RATE, ESCENARIO D.1_100 .....	78
FIGURA 78: CDF SINR, ESCENARIO D.1_100.....	78



FIGURA 79: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.1_100 .....	78
FIGURA 80: SINR, ESCENARIO D.2_100.....	79
FIGURA 81: BIT RATE, ESCENARIO D.2_100 .....	79
FIGURA 82: CDF SINR, ESCENARIO D.2_100.....	79
FIGURA 83: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.2_100 .....	79
FIGURA 84: SINR, ESCENARIO D.3_100.....	80
FIGURA 85: BIT RATE, ESCENARIO D.3_100 .....	80
FIGURA 86: CDF SINR, ESCENARIO D.3_100.....	80
FIGURA 87: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.3_100 .....	80
FIGURA 88: SINR, ESCENARIO D.1_250.....	81
FIGURA 89: BIT RATE, ESCENARIO D.1_250 .....	81
FIGURA 90: CDF SINR, ESCENARIO D.1_250.....	81
FIGURA 91: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.1_250 .....	81
FIGURA 92: SINR, ESCENARIO D.2_250.....	82
FIGURA 93: BIT RATE, ESCENARIO D.2_250 .....	82
FIGURA 94: CDF SINR, ESCENARIO D.2_250.....	82
FIGURA 95: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.2_250 .....	82
FIGURA 96: SINR, ESCENARIO D.3_250.....	83
FIGURA 97: BIT RATE, ESCENARIO D.3_250 .....	83
FIGURA 98: CDF SINR, ESCENARIO D.3_250.....	83
FIGURA 99: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.3_250 .....	83
FIGURA 100: SINR, ESCENARIO D.1_500.....	84
FIGURA 101: BIT RATE, ESCENARIO D.1_500 .....	84
FIGURA 102: CDF SINR, ESCENARIO D.1_500.....	84
FIGURA 103: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.1_500 .....	84
FIGURA 104: SINR, ESCENARIO D.2_500.....	85
FIGURA 105: BIT RATE, ESCENARIO D.2_500 .....	85

FIGURA 106: CDF SINR, ESCENARIO D.2_500.....	85
FIGURA 107: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.2_500 .....	85
FIGURA 108: SINR, ESCENARIO D.3_500.....	86
FIGURA 109: BIT RATE, ESCENARIO D.3_500 .....	86
FIGURA 110: CDF SINR, ESCENARIO D.3_500.....	86
FIGURA 111: CDF BIT RATE, ESCENARIO D.3_500 .....	86
FIGURA 112: SINR, ESCENARIO E.1_10 .....	87
FIGURA 113: BIT RATE, ESCENARIO E.1_10.....	87
FIGURA 114: CDF SINR, ESCENARIO E.1_10 .....	87
FIGURA 115: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.1_10.....	87
FIGURA 116: SINR, ESCENARIO E.2_10 .....	88
FIGURA 117: BIT RATE, ESCENARIO E.2_10.....	88
FIGURA 118: CDF SINR, ESCENARIO E.2_10 .....	88
FIGURA 119: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.2_10.....	88
FIGURA 120: SINR, ESCENARIO E.3_10 .....	89
FIGURA 121: BIT RATE, ESCENARIO E.3_10.....	89
FIGURA 122: CDF SINR, ESCENARIO E.3_10 .....	89
FIGURA 123: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.3_10.....	89
FIGURA 124: SINR, ESCENARIO E.1_50 .....	90
FIGURA 125: BIT RATE, ESCENARIO E.1_50.....	90
FIGURA 126: CDF SINR, ESCENARIO E.1_50 .....	90
FIGURA 127: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.1_50.....	90
FIGURA 128: SINR, ESCENARIO E.2_50 .....	91
FIGURA 129: BIT RATE, ESCENARIO E.2_50.....	91
FIGURA 130: CDF SINR, ESCENARIO E.2_50 .....	91
FIGURA 131: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.2_50.....	91
FIGURA 132: SINR, ESCENARIO E.3_50 .....	92

FIGURA 133: BIT RATE, ESCENARIO E.3_50 .....	92
FIGURA 134: CDF SINR, ESCENARIO E.3_50 .....	92
FIGURA 135: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.3_50 .....	92
FIGURA 136: SINR, ESCENARIO E.1_100 .....	93
FIGURA 137: BIT RATE, ESCENARIO E.1_100 .....	93
FIGURA 138: CDF SINR, ESCENARIO E.1_100 .....	93
FIGURA 139: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.1_100 .....	93
FIGURA 140: SINR, ESCENARIO E.2_100 .....	94
FIGURA 141: BIT RATE, ESCENARIO E.2_100 .....	94
FIGURA 142: CDF SINR, ESCENARIO E.2_100 .....	94
FIGURA 143: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.2_100 .....	94
FIGURA 144: SINR, ESCENARIO E.3_100 .....	95
FIGURA 145: BIT RATE, ESCENARIO E.3_100 .....	95
FIGURA 146: CDF SINR, ESCENARIO E.3_100 .....	95
FIGURA 147: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.3_100 .....	95
FIGURA 148: SINR, ESCENARIO E.1_250 .....	96
FIGURA 149: BIT RATE, ESCENARIO E.1_250 .....	96
FIGURA 150: CDF SINR, ESCENARIO E.1_250 .....	96
FIGURA 151: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.1_250 .....	96
FIGURA 152: SINR, ESCENARIO E.2_250 .....	97
FIGURA 153: BIT RATE, ESCENARIO E.2_250 .....	97
FIGURA 154: CDF SINR, ESCENARIO E.2_250 .....	97
FIGURA 155: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.2_250 .....	97
FIGURA 156: SINR, ESCENARIO E.3_250 .....	98
FIGURA 157: BIT RATE, ESCENARIO E.3_250 .....	98
FIGURA 158: CDF SINR, ESCENARIO E.3_250 .....	98
FIGURA 159: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.3_250 .....	98

FIGURA 160: SINR, ESCENARIO E.1\_500 .....99

FIGURA 161: BIT RATE, ESCENARIO E.1\_500 .....99

FIGURA 162: CDF SINR, ESCENARIO E.1\_500 .....99

FIGURA 163: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.1\_500 .....99

FIGURA 164: SINR, ESCENARIO E.2\_500 .....100

FIGURA 165: BIT RATE, ESCENARIO E.2\_500 .....100

FIGURA 166: CDF SINR, ESCENARIO E.2\_500 .....100

FIGURA 167: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.2\_500 .....100

FIGURA 168: SINR, ESCENARIO E.3\_500 .....101

FIGURA 169: BIT RATE, ESCENARIO E.3\_500 .....101

FIGURA 170: CDF SINR, ESCENARIO E.3\_500 .....101

FIGURA 171: CDF BIT RATE, ESCENARIO E.3\_500 .....101



# Índice de tablas

TABLA 1: EVOLUCIÓN DE LAS REDES MÓVILES.....	10
TABLA 2: EVOLUCIÓN DEL ESTÁNDAR 3GPP.....	10
TABLA 3: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LTE .....	12
TABLA 4: MCS.....	22
TABLA 5: PARÁMETROS DEL EXPONENTE DE PROPAGACIÓN Y SHADOWING .....	35
TABLA 6: TASA BINARIA Y SINR MÍNIMO POR MCS .....	42
TABLA 7: MULTIPLEXACIÓN USADA PARA CADA BANDA .....	43
TABLA 8: PARÁMETROS DE SIMULACIÓN .....	45







# 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el uso de las comunicaciones móviles está a la orden del día. La demanda de tecnologías que proporcionen altas velocidades de conexión en casi cualquier sitio está creciendo de manera notable, por lo que el nivel de exigencia en cuanto a la calidad de conexión que los usuarios solicitan en el hogar o en otro tipo de edificaciones de uso habitual es muy alto.

Es aquí donde entran en juego los dos elementos clave que se han usado para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster: las *femtoceldas* y el estándar de comunicaciones móviles LTE (Long Term Evolution). Aunque ambos términos se explicarán en profundidad más adelante en esta memoria, la idea principal es que con el uso de las *femtoceldas* se mejore la cobertura móvil dentro de los edificios y con el uso de LTE se consigan altas velocidades de transmisión de datos de manera eficiente.

## 1.1 Motivación

Este trabajo viene motivado por el problema que presentan los operadores de telefonía a la hora de asegurar o mejorar la calidad de las comunicaciones móviles en zonas cerradas, donde la señal móvil se vea afectada por varios factores atenuantes como pueden ser paredes o fachadas. Este problema cobra mayor peso si tenemos en cuenta la tendencia actual donde las comunicaciones móviles están adquiriendo día a día mayor importancia frente a las comunicaciones fijas, que cada vez caen más en desuso.

También hay que tener en cuenta que actualmente un dispositivo móvil no ofrece únicamente servicios de voz, si no que integra toda clase de servicios, por lo que se crea una red global de comunicaciones la cual se pretende que tenga una accesibilidad total, de manera que cualquier usuario tenga accesibilidad en cualquier parte sin depender de una red fija.

Aunque por ahora la tecnología más usada en las comunicaciones móviles es la de tercera generación, como puede ser UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), la demanda de velocidades más altas de conexión y de mayor calidad está haciendo que el uso de tecnologías de cuarta generación como el LTE sea cada vez más habitual, hasta el punto que ya casi todos los dispositivos móviles de nueva fabricación soportan el uso del 4G y la mayoría de las operadoras de telefonía ofrecen servicios con esta tecnología.

A pesar de que se consigan aumentar las prestaciones de las comunicaciones móviles con el uso de LTE, sigue apareciendo el problema de la calidad en zonas cerradas donde la cobertura proporcionada por celdas ordinarias es mala o al menos insuficiente. Aquí es donde entran las *femtoceldas* como solución al problema.

Básicamente una femtocelda es una estación base de baja potencia y tamaño pequeño diseñada para espacios cerrados como pueden ser hogares o negocios. Normalmente, se conecta a la red del proveedor de servicio a través de una conexión de banda ancha cableada, típicamente ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) o cable, y sustituye de forma completa y automática a la cobertura y conexión con las estaciones base del operador móvil. De esta manera, se ofrece una cobertura móvil 4G a los usuarios que estén dentro del área de actuación de la *femtocelda*.

A parte de la ventaja clara de la mejora de cobertura en espacios cerrados, el uso de las *femtoceldas* ofrece un enlace de mayor calidad sin tener que modificar las estaciones base de la propia operadora móvil y sin tener que cambiar de dispositivo móvil. También cabe resaltar el bajo coste que supone la instalación y uso de una *femtocelda*. Este hecho también supone una solución a los operadores móviles que ven cómo se satura el tráfico en sus estaciones base y que encuentra una vía de escape en el uso de las *femtoceldas* para manejar tráfico en ámbito local.

Como cabría esperar, no son todas ventajas lo que proporciona el uso de las *femtoceldas*. Dado que, como se ha mencionado anteriormente, las operadoras móviles actúan con estaciones base de gran alcance, se producen interferencias entre los enlaces de estas estaciones y de las *femtoceldas*. Estas interferencias también serán objeto de estudio en este TFM.

## 1.2 Objetivos

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Máster consiste en realizar un estudio del impacto del uso de la tecnología LTE a través de *femtoceldas*, ya que, como se ha explicado a lo largo de la introducción, el uso de comunicaciones móviles de cuarta generación ofrece las prestaciones requeridas por los usuarios actualmente y la introducción de las *femtoceldas* ofrece una solución al problema de la cobertura móvil en interiores, aunque la introducción de estas estaciones base de baja potencia está en franco desarrollo.

Este estudio se centrará principalmente en el cálculo del nivel de señal recibida en cada punto de un hogar con diferentes escenarios, teniendo en cuenta todas las atenuaciones que sufre dicha señal y las interferencias provocadas por otras de la misma índole, es decir, se calculará para cada punto del hogar el nivel SINR (Signal to Interferences plus Noise Ratio). También se obtendrá para cada punto del hogar el nivel de tasa binaria disponible para los distintos escenarios.

Para la consecución del objetivo principal mencionado anteriormente se han establecido los siguientes objetivos parciales:

- En la primera parte del proyecto se ha realizado un estudio de la técnica a aplicar. Este estudio comprende tanto el conocimiento de los parámetros técnicos de LTE como los de las femtoceldas, así como los modelos de atenuación a utilizar para el cálculo de la señal y otros modelos de propagación de señales de interferencia, como por ejemplo los parámetros de transmisión de las macroceldas.

- Una vez comprendidos los aspectos teóricos a aplicar, se ha realizado el cálculo de señal en un piso de 5 habitaciones y un pasillo. Para ello, se ha dividido cada habitación del piso en celdas de  $0.05\text{ m}^2$  y se ha calculado la señal en el centro de cada una de ellas, únicamente teniendo en cuenta las pérdidas por propagación en el espacio libre, por atenuación de paredes y por multitrayecto. Es decir, no se ha tenido en cuenta el efecto de ninguna señal interferente.
- Utilizando el punto anterior como base, se ha calculado el nivel de señal de la misma manera en cada celda, pero esta vez teniendo en cuenta que el piso pertenece a un edificio de 6 plantas, cada una de ellas con su propia femtocelda, pero compartiendo frecuencia de operación de manera alternada. Es decir, el primer piso actuaría con la misma frecuencia que el tercer piso y que el quinto, los cuales serían los que provocarían las interferencias, y el segundo piso actuaría con la misma frecuencia que el cuarto y el sexto.
- Posteriormente se ha estudiado un escenario en el que coexisten 3 edificios de las mismas características que el descrito en el punto anterior.
- Por último, se han ampliado los resultados obtenidos en el apartado anterior analizando las interferencias que provocaría una macrocelda situada a cierta distancia de los tres edificios.

### **1.3 Estructura de la memoria**

La memoria de este Trabajo de Fin de Máster está estructurada en 6 secciones. En la primera de ellas, en la cual nos encontramos, se realiza una breve introducción del tema a tratar.

En la segunda sección se introduce al estándar LTE, explicando la evolución de las comunicaciones móviles hasta llegar a este estándar y sus características técnicas.

En la sección 3 se exponen las características de las femtoceldas, analizando las ventajas que presenta el usarlas y su arquitectura de funcionamiento.

Una vez expuestos los dos elementos clave de este TFM, se explicará en la sección 4 como se ha llevado a cabo la obtención del SINR y de la tasa binaria, mostrando los resultados en la sección 5.

Por último, en la sección 6, se expondrán las conclusiones obtenidas a lo largo de este trabajo y se establecerán unas posibles líneas de trabajo futuro.



## 2. TECNOLOGÍA LTE

### 2.1 ¿Qué es LTE?

El termino LTE es un estándar de comunicación que surge como la evolución de la tecnología GSM/HSPA para conseguir un sistema *packet-optimized*. La principal meta de LTE es crear especificaciones para una nueva tecnología de comunicación móvil que alcance altas tasas de transferencia de datos, tenga baja latencia y muestre una buena eficiencia espectral.

Para conseguir dicha eficiencia espectral, el estándar LTE hace uso de técnicas como el *low-PAR orthogonal uplink multiple acces* basada en SC-FDMA (Single Carrier Frequency Divison Multiple Access), MIMO (tecnología *multiple-input multiple-output multi-antenna*), técnicas de migración para interferencias inter-células o estructura de baja latencia por canal, además de otras.

### 2.2 Evolución de las tecnologías móviles

La historia de las comunicaciones móviles es relativamente corta en el tiempo, a pesar da la gran evolución que ha sufrido en los últimos años. La primera generación de sistemas móviles se lanzó en la década de 1980, aunque para entonces ya existían ciertos teléfonos móviles. En concreto, el primer móvil se creó en Estados Unidos poco después de terminar la Segunda Guerra Mundial, aunque este no era un teléfono móvil como los creados en 1980, ya que se basaba en la tecnología radio y no en sistemas celulares, por lo que no daban soporte a conceptos como *handover* o *roaming* y la llamada sólo se podía realizar dentro del área de cobertura de la antena transmisora [1].

La primera generación de sistemas celulares eran sistemas analógicos donde cada banda de frecuencia sólo podía manejar una única llamada, por lo que la capacidad del sistema resultaba bastante pequeña. Aun así, presentaba una gran diferencia con los sistemas de radio-telefonía ya que el uso del concepto de sistema celular permite la reutilización de la frecuencia de transmisión, además de

proveer una manera fácil de incrementar la capacidad del sistema con respecto a los sistemas radio, para soportar un mayor número de usuarios.

Un sistema celular está compuesto de varias estaciones base las cuales dan cobertura a diferentes áreas denominadas celdas. El tamaño de cada celda depende del lugar donde se encuentre la estación base. Si ésta está situada en zonas rurales, el tamaño del radio de actuación se incrementa a costa de reducir la capacidad del sistema, mientras que si la estación base está situada en una ciudad, su radio de cobertura es menor pero su capacidad se incrementa. Esto también es debido a que el número de celdas de una ciudad es mucho mayor que en zonas rurales. Como se ha comentado anteriormente, el sistema celular soporta *handovers*, de manera que un usuario puede moverse del área de actuación de una celda a otra sin perder la conexión de la llamada.

La segunda generación de sistemas móviles fue la primera en emplear tecnología de transmisión digital. Gracias a esto, se incrementó de manera notable la capacidad de los sistemas y la calidad de los servicios. Como principal diferencia entre ambas generaciones, cabe destacar que en los sistemas de primera generación una única llamada ocupaba un canal de frecuencia mientras que en los sistemas de segunda generación el canal de frecuencia se divide para dar soporte a varios usuarios mediante técnicas de *time-division* o de *code-division*. A parte de este avance, los nuevos sistemas 2G introdujeron otras mejoras que permitieron el incremento de capacidad mencionado anteriormente.

Los cuatro sistemas principales de comunicaciones móviles de segunda generación son: GSM (Global System for Mobile communications), D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone System), CDMA (Code Division Multiple Access) y PDC (Personal Digital Cellular). Hay que denotar que estos sistemas son la base de las comunicaciones móviles actuales.

El gran éxito que tuvo la aparición de estos sistemas 2G, con un número cada vez mayor de usuarios, hizo evidente la necesidad de ampliar la capacidad del sistema



de manera rápida, por lo que el diseño de los sistemas de tercera generación se comenzó al mismo tiempo que se desplegaban los sistemas de segunda generación.

La red PDC de Japón se vio rápidamente desbordada en cuanto a capacidad, por lo que la empresa NTT DoCoMo se vio obligada a implantar los sistemas 3G más rápido que cualquier otra empresa. La tecnología utilizada por NTT fue una evolución de WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), mientras que en Europa se eligió trabajar con CDMA y TDMA (Time Division Multiple Access).

Como consecuencia de estas diferencias y con el fin de formalizar las tecnologías 3G, la ITU (International Telecommunication Union) redactó la orden IMT-2000 donde se establecían las condiciones necesarias para que una red fuese considerada de tercera generación y aceptó cinco propuestas de red 3G que cumplieran estas condiciones, de las cuales sólo se utilizaron tres. Las propuestas UTRA FDD (Frequency Division Duplexing) y UTRA TDD (Time Division Duplexing), comúnmente conocidas como WCDMA o UMTS, serían desarrolladas por el consorcio 3GPP (Third Generation Partnership Project), y la propuesta CDMA200 sería desarrollada por el consorcio 3GPP2.

De la evolución de la tecnología desarrollada por la organización 3GPP es de donde nace el estándar LTE, nombrado por primera vez en el *Release 8* emitido por 3GPP. Aunque LTE sea conocido coloquialmente como 4G, esta primera versión de LTE no cumple los requisitos de red de cuarta generación establecidos por la ITU y no será hasta la publicación del *Release 10* donde se muestra un estándar, denominado LTE-Advanced, que sí cumple las especificaciones.

A continuación se muestra una tabla con las principales características técnicas de cada una de las redes nombradas anteriormente:

Tabla 1: Evolución de las redes móviles

Date	System	Peak data rate	Channel Bandwidth	Frequency reuse	Peak Spectral efficiency	Normalized efficiency
1985	AMPS	9.6 kbps	30 kHz	7 / 21	0.015	1
1992	GSM	9.6 – 14.4 kbps	200 kHz	4 / 12	0.032 - 0.048	2.1 – 3.2
1997	GPRS	171 kbps	200 kHz	4 / 12	.07	4.7
2000	EDGE	474 kbps	200 kHz	4 / 12	0.2	13.3
2003	W-CDMA	2 Mbps	5 MHz	1	0.4	26.6
2006	HSDPA	14 Mbps	5 MHz	1	2.8	187
2009	HSDPA+ 64QAM & 2x2 MIMO	42 Mbps	5 MHz	1	8.4	560
2011	LTE	100 Mbps	20 MHz	1	5	333
2012	LTE 2x2 MIMO	172.8 Mbps	20 MHz	1	8.6	576
2013	LTE 4x4 MIMO	326.4 Mbps	20 MHz	1	16.3	1087
2015	IMT-Advanced targets	1 Gbps	100 MHz	1	10	667

Dado que la tecnología utilizada en este Trabajo de Fin de Máster es LTE, es conveniente conocer la evolución que ha seguido las tecnologías desarrolladas por 3GPP hasta alcanzar el 4G. Hay que destacar que a partir del *Release 5*, con el HSDPA, se empiezan a realizar envíos de paquetes para comunicaciones *downlink* y ya con la llegada del HUDPA, en el *Release 6*, se realizan envíos de paquetes *uplink*. Posteriormente ambos se combinaron en el HSPA +, base del actual LTE.

Tabla 2: Evolución del estándar 3GPP

	Year	Standards	Technological evolution
1.	1999	3GPP Rel 99	GSM, GPRS, EDGE, UMTS based (2G, 2.5G, 2.75G, 3G)
2.	2001	3GPP Rel 4	Minor upgrades to UMTS, radio interface
3.	2002	3GPP Rel 5	HSDPA , IMS architecture (3.5G)
4.	2005	3GPP Rel 6	Higher speeds
5.	2007	3GPP Rel 7	HSPA+,PoC, Voice & Video over VOIP
6.	2008	3GPP Rel 8	EPS (E-UTRAN/LTE) (3.99G/4G)
7.	2009	3GPP Rel 9	Enhancement to EPS
8.	2010	3GPP Rel 10	LTE- Advanced (4G)

## 2.3 Características técnicas

El principal objetivo de LTE es alcanzar una alta tasa de transferencia de paquetes, baja latencia y una tecnología de radio-acceso *packet-optimized*. En paralelo, se desarrolla junto a una nueva arquitectura de red que tiene como fin manejar el tráfico de paquetes de manera continua sin interrupciones, asegurando la calidad del servicio y una latencia mínima [2].

El sistema LTE soporta anchos de banda flexibles gracias a los esquemas de acceso OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) y SC-FDMA. También incorpora un sistema half-duplex FDD a parte de los FDD y TDD comunes en las tecnologías de comunicación móvil. Este sistema half-duplex permite que para transmitir y recibir información a la vez no sea necesario el uso de un UE (User Equipment), evitando así que estos UEs tengan que incorporar un duplexor, lo cual resulta costoso.

El sistema está optimizado para dar soporte a usuarios que se muevan a velocidades inferiores a 15 Km/h, pero las especificaciones del sistema permiten que se pueda dar soporte a usuarios que se estén trasladando a velocidades de hasta 350 Km/h, aunque se sufra cierta degradación en la calidad del sistema.

El acceso uplink se basa en una sola frecuencia portadora con acceso múltiple por división (SC\_FDMA) que permite incrementar la cobertura uplink con menos potencia media (PAPR, Peak-to-Average Power Ratio) en comparación con OFDMA. Por otro lado, soporta velocidades downlink de hasta 326 Mb/s con 4x4 MIMO dentro de un ancho de banda de 20 MHz. Como en el enlace uplink no se usa la misma antena MIMO, se alcanzan velocidades menores que en el enlace downlink, llegando hasta los 86 Mb/s dentro del mismo ancho de banda.

En términos de latencia, la interfaz radio de LTE permiten conseguir menos de 10 ms de latencia para la transmisión de un paquete desde la red hasta el UE.

En la siguiente tabla se muestran las principales características técnicas que presentan los sistemas LTE:

*Tabla 3: Características técnicas de LTE*

Bandwidth		1,25-20 MHz
Duplexing		FDD, TDD, half-duplex FDD
Mobility		350 Km/h
Multiple access	Downlink	OFDMA
	Uplink	SC-FDMA
MIMO	Downlink	2 x 2, 4 x 2, 4 x 4
	Uplink	1 x 2, 1 x 4
Peak data rate in 20 MHz	Downlink	173 and 326 Mb/s, for 2 x 2 and 4 x 4 MIMO
	Uplink	86 Mb/s with 1 x 2 antenna configuration
Modulation		QPSK, 16-QAM and 64-QAM
Channel coding		Turbo code

En los siguientes apartados se explicará con mayor detalle las modulaciones usadas, las diferentes interfaces de radio y el tipo de codificación que implementa LTE, ya que han sido parámetros fundamentales para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster.

### 2.3.1 Modulación

Según la American National Standard for Telecommunications, la modulación es el proceso, o el resultado del proceso, de variar una característica de una onda portadora de acuerdo con una señal que transporta información. Básicamente, la modulación consiste en hacer que un parámetro de la onda portadora cambie de valor de acuerdo con las variaciones de la señal moduladora, que es la información que queremos transmitir.

El término modulación engloba el conjunto de técnicas que se usan para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal. Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de

comunicación, lo que posibilita transmitir más información de forma simultánea además de mejorar la robustez de la señal contra posibles ruidos e interferencias. A pesar del gran número de tipos de modulaciones que existen, nos vamos a centrar en las modulaciones tipo PSK (Phase Shift Keying) y QAM (Quadrature Amplitude Modulation) ya que son las que utiliza LTE para modular su señal.

### 2.3.1.1 Modulación PSK

La modulación denominada *Phase Shift Keying* se basa en el desplazamiento de la fase de la portadora. Es un tipo de modulación angular donde la fase toma un número de valores discretos donde se contiene la información, de manera que cada uno de estos valores representa los símbolos de la señal moduladora con un valor angular. Este valor angular es elegido por el modulador entre un conjunto de “n” valores discretos posibles.

El modulador PSK representa la información directamente a través del valor absoluto de la fase de la señal modulada. Con esto se consigue que el demodulador sea capaz de obtener el valor transmitido mediante la comparación entre la fase de la señal recibida y la fase de la portadora sin modular.

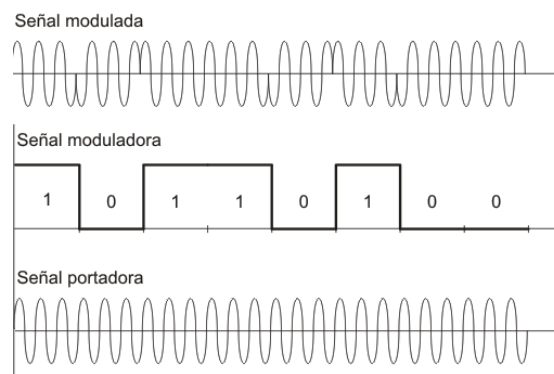


Figura 1: Formas de onda en PSK

Dependiendo del tamaño “n” de valores discretos que pueda tomar la fase de la señal portadora, la modulación PSK recibe diferentes nombres. Dado que lo más común es codificar un número entero de bits por cada símbolo, el número de fases

a tomar es una potencia de dos. Así, se tendrán modulaciones BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 8-PSK y así sucesivamente. Cuanto mayor sea el número de fases posibles, mayor será la cantidad de información que se pueda transmitir utilizando el mismo ancho de banda, pero se incrementará la sensibilidad frente al ruido e interferencias.

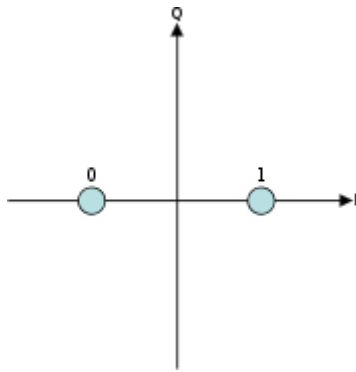


Figura 2: Modulación BPSK

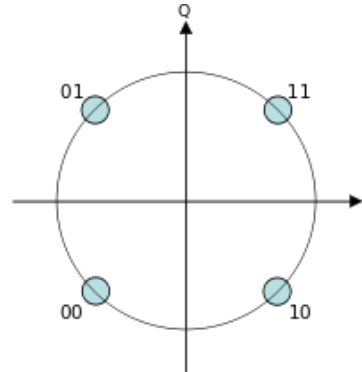


Figura 3: Modulación QPSK

Las modulaciones BPSK y QPSK, derivadas de la modulación por desplazamiento de fase, son óptimas desde el punto de vista de protección frente a errores. En esencia, la diferencia entre distintos símbolos asociados a cada fase es máxima para la potencia y ancho de banda utilizados. No pasa lo mismo con otras variantes tales como la PSK de 8 niveles (8-PSK), la de 16 (16-PSK) o superiores, para las cuales existen otros esquemas de modulación digital más eficientes.

La ventaja principal que presenta PSK frente a otras modulaciones es que la potencia de todos los símbolos es la misma, por lo que se simplifica el diseño de los amplificadores y de las etapas receptoras. Gracias a esto la potencia de fuente es constante, lo que implica una reducción de costes.

### 2.3.1.2 Modulación QAM

*Quadrature Amplitude Modulation* es una técnica de modulación en la que se transportan dos señales independientes tanto en amplitud como en fase. Esto se consigue modulando la misma portadora desfasada  $90^\circ$ . La señal modulada en

QAM queda compuesta por dos señales, las cuales están previamente moduladas en Doble Banda Lateral.

Como entrada, la señal modulada en QAM tiene un flujo de datos binarios los cuales se dividen en grupos de tantos bits como sean necesarios para generar  $N$  estados de modulación. Dependiendo de los estados que contenga la señal, se habla de  $N$ -QAM. Por ejemplo, en una señal modulada con 4-QAM se generarán 4 estados de modulación cada 2 bits de entrada, de manera que cada estado sea una variante en fase y amplitud de la señal portadora. De esta manera, en  $N$ -QAM cada grupo de  $m$  bits genera  $2^m = N$  estados de modulación.

Para representar los diferentes estados de modulación posibles en las técnicas de modulación digital, como la QAM, se utiliza el llamado diagrama de constelación. Los puntos de la "constelación" están uniformemente dispuestos en una rejilla cuadrada con igual separación vertical y horizontal, aunque son posibles otras configuraciones. Dado que los datos que se utilizan en las comunicaciones digitales son binarios y que el número de estados de modulación en QAM es generalmente un número cuadrado, las formas más comunes son de 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM.

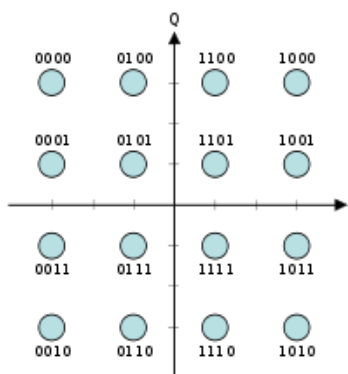


Figura 4: Modulación 16-QAM



Figura 5: Modulación 64-QAM

Cuanto mayor sea el orden de la constelación, mayor será el número de bits que se pueda transmitir por símbolo. Sin embargo, la energía promedio de una constelación no varía de una a otra, lo que implica que al aumentar el orden los puntos correspondientes a los diferentes estados estén más juntos, siendo más susceptibles al ruido y a la distorsión. Este hecho provoca una tasa de bits de error más alta, por lo que no siempre aumentar el orden de la modulación implica una mejor transmisión de datos.

Normalmente, si se necesitan velocidades de transmisión superiores a la que ofrecen los esquemas de modulación de 8-PSK, se usa QAM, ya que se obtiene una distancia mayor entre puntos adyacentes del plano I-Q dado que se distribuyen los puntos de manera uniforme, aunque, en este caso, los puntos no tendrían la misma amplitud, por lo que el demodulador QAM tendrá que ser capaz de detectar correctamente tanto fase como amplitud, añadiendo más complejidad al diseño.

### **2.3.2 Interfaz de radio**

En el ámbito de las Telecomunicaciones, la multiplexación se entiende como la técnica de combinar dos o más símbolos en una sola señal de información para no tener que transmitirlos de manera individual, de manera que se ahorran costes y recursos.

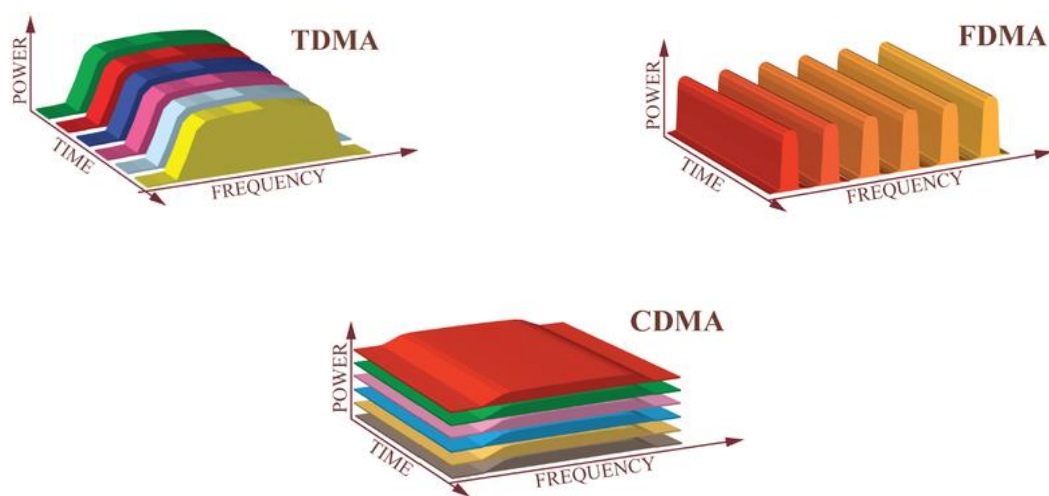
En la tecnología LTE se distinguen dos casos en los que se utiliza la multiplexación: para en enlace *downlink* y para el *uplink*, los cuales utilizan OFDMA y SC-FDMA respectivamente. Pero, para poder entender esos dos tipos de multiplexación, es necesario conocer los tres tipos básicos que existen: FDMA (Frequency Division Multiple Access), TDMA (Time Division Multiple Access) y CDMA (Code Division Multiple Access).

En FDMA el acceso al medio se realiza dividiendo el espectro disponible en canales correspondientes a distintos rangos de frecuencia, de manera que cada usuario utilice un canal diferente para establecer la comunicación sin interferir en



los demás canales. TDMA, por el contrario, distribuye la información en ranuras alternas de tiempo (slots), proveyendo acceso múltiple a un reducido número de frecuencias.

CDMA combina FDMA y TDMA para conseguir ocupar el máximo rango de frecuencias en el mayor tiempo posible. Para ello cada usuario de un sistema CDMA emplea un código de transmisión distinto (y único) para transmitir su señal, utilizando de esta manera todo el rango de frecuencias el mayor tiempo posible,



*Figura 6: Multiplexaciones TDMA, FDMA y CDMA*

Una vez explicados los tres tipos básicos de multiplexación que utilizan las comunicaciones móviles, es necesario explicar el precursor de las multiplexaciones que utiliza LTE, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

OFDM es una modulación digital multiportadora con subportadoras transportadas de manera paralela con un intervalo entre ellas y moduladas de diferente manera. La principal ventaja que presenta es que es una técnica fácilmente ampliable a grandes canales. Además, cada paquete cuenta con un prefijo cíclico que actúa de salvaguarda entre señales subportadoras, de manera que asegure que no haya

interferencias entre subportadoras adyacentes. El inconveniente que presenta OFDM es su sensibilidad a errores de frecuencia y fase.

### **2.3.2.1 OFDMA y SC-FDMA**

En OFDMA el acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras (subcarriers), las cuales se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios. Para conseguir una mayor eficiencia, el sistema se realimenta con las condiciones que presenta el canal en cada momento, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que éste necesita y de las condiciones del canal. Si la asignación se hace rápidamente, se consigue cancelar de forma eficiente las interferencias co-canal y los desvanecimientos rápidos, proporcionando una mejor eficiencia espectral del sistema que OFDM [3].

Este método de multiplexación se parece al CDMA por emplear la tecnología del espectro separado, donde a cada transmisor se le asigna un código. En este sistema, los usuarios pueden alcanzar altas velocidades de conexión sin sufrir muchas interferencias ya que a cada usuario se le asigna un factor que permite separa los códigos que este transmitiendo de los demás usuarios.

OFDMA se puede entender como una combinación de OFDM con TDMA , ya que diferentes usuarios realizan un acceso por división en tiempo, con lo que se incrementa la capacidad de OFDM. Gracias a esto, los usuarios que estén transmitiendo poco volumen de información pueden enviar su información de manera continua a baja potencia.

OFDMA se puede describir también como un acceso donde repartimos los recursos en el espacio formado por el eje temporal y el eje de frecuencias. La información se asigna a subportadoras que ocupan un espacio temporal y frecuencial determinado (espacio tiempo-frecuencia).

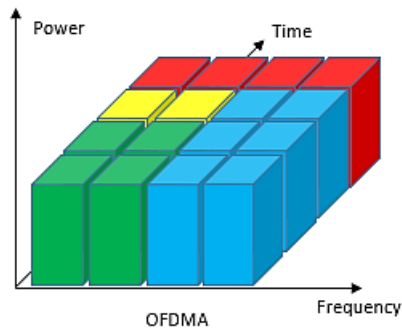


Figura 7: Multiplexación OFDMA

SC-FDMA se puede considerar como una versión precodificada, mediante la transformada discreta de Fourier (DFT), de OFDMA. Para realizar esta precodificación, los símbolos modulados mediante un esquema N-PSK o N-QAM pasan por un bloque DFT donde son convertidos al dominio de la frecuencia. Con esto se consigue que los símbolos estén distribuidos por cada subportadora que forma el ancho de banda que ocupa el usuario. Para poder recibir la información de manera correcta, el receptor deberá contener un bloque IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform), el cual no existía en OFDM y que añade complejidad al sistema. Gracias a esta precodificación se consigue una reducción del PAPR con respecto a OFDMA. En la siguiente figura podemos apreciar las principales diferencias entre OFDMA y SC\_FDMA.

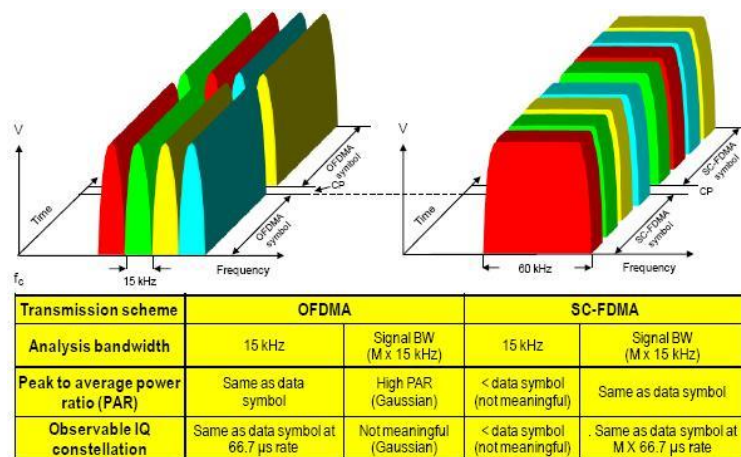


Figura 8: Diferencias entre OFDMA y SC-DMA

### 2.3.3 Codificación de canal

Cuando se transmite información a través de un canal de comunicaciones lo ideal sería que la señal emitida desde el transmisor llegase íntegra y sin alteraciones al receptor. En la realidad esto no es posible debido a que la señal emitida sufre alteraciones provocadas por diferentes elementos, entre los que se encuentran los diferentes tipos de ruido existentes. Todas estas modificaciones hacen que la señal recibida en el receptor no sea la original.

Para corregir estos errores se modifica la señal a la salida, lo que se conoce como codificación de canal, con el objetivo de reducir la probabilidad de error o de garantizar un nivel de señal/ruido adecuado para la correcta recepción de la información. El funcionamiento básico de la codificación de canal consiste en añadir bits de redundancia a la información transmitida para poder ser capaz de corregir los errores en el receptor, o al menos detectar si se han producido errores.

Como se ha visto anteriormente, LTE utiliza turbo códigos para la codificación de canal. La principal idea de esta técnica de codificación es concatenar dos o más códigos para crear un código mucho más potente que los que se creaban con los codificadores tradicionales, ya que un único código de protección de errores no siempre proporciona resultados fiables cuando la complejidad es alta.

La manera de crear un turbo código es concatenar dos codificadores relativamente sencillos separados por un dispersor, de manera que se crea un conjunto equivalente a un único codificador convolucional de memoria tan grande como la profundidad del dispersor pero con un proceso de decodificación simplificado que en ningún caso alcanza la complejidad del convolucional equivalente. Con esto se subsana el principal problema de los codificadores convolucionales, ya que las prestaciones de un codificador convolucional mejoran al aumentar la memoria, pero no se puede aumentar la memoria indiscriminadamente ya que la complejidad en el proceso de decodificación crece exponencialmente.

Los turbo códigos se caracterizan por el uso de codificación paralela concatenada, el uso de codificadores convolucionales recursivos, el uso de un dispersor pseudo-aleatorio y el uso de una decodificación recursiva.

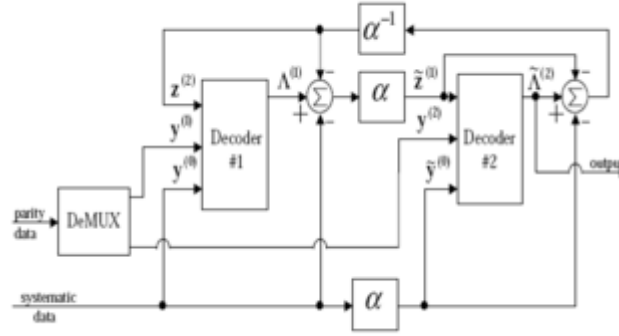


Figura 9: Esquema de un turbo-codificador

### 2.3.4 Modulation Coding Scheme

Como se ha explicado, la codificación de canal actúa sobre la señal de entrada, que en el caso de un sistema LTE, es una señal modulada en PSK o en QAM. Por lo tanto se establece una relación directa entre codificación y modulación, de manera que el uso de los turbo códigos determinará la eficiencia de un esquema de modulación determinado. Así, si se transmite con una eficiencia de 0.5, significará que la mitad de los bits contenidos en la señal modulada proporcionarán información útil y la otra mitad corresponderá a bits de redundancia.

En la siguiente tabla se muestra la relación entre los diferentes tipos de modulaciones y la tasa de codificación generada por el turbo código, estableciéndose para cada relación un MCS (Modulation Coding Scheme) diferente [4].

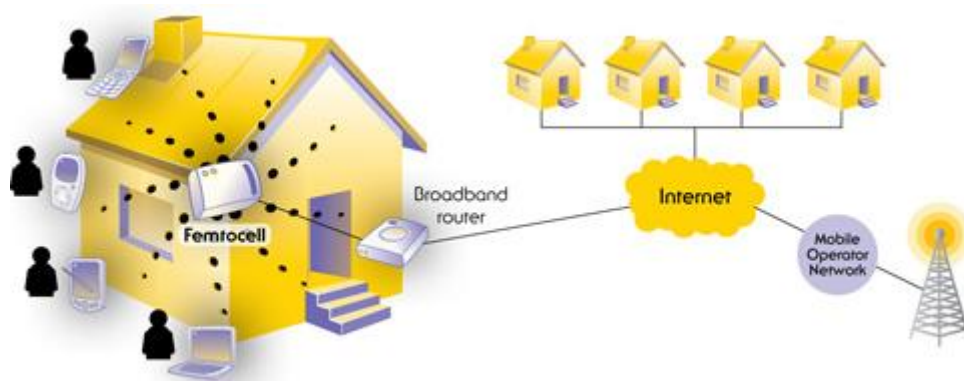
Tabla 4: MCS

MCS	Modulación	Orden de la modulación	Tasa de codificación
0			
1	QPSK	2	0.17
2	QPSK	2	0.23
3	QPSK	2	0.29
4	QPSK	2	0.36
5	QPSK	2	0.45
6	QPSK	2	0.55
7	QPSK	2	0.64
8	16QAM	4	0.5
9	16QAM	4	0.55
10	16QAM	4	0.62
11	16QAM	4	0.72
12	16QAM	4	0.8
13	64QAM	6	0.64
14	64QAM	6	0.68
15	64QAM	6	0.76
16	64QAM	6	0.82
17	64QAM	6	0.91

## 3. FEMTOCELDA

### 3.1 ¿Qué es una femtocelda?

Una femtocelda es una estación base de pequeño tamaño y de baja potencia diseñada para dar cobertura móvil a lugares cerrados de extensión pequeña. Esta estación se integra en la red móvil mediante una conexión de banda ancha, normalmente ADSL, de modo que ahora es la propia red del usuario la que le da cobertura y no la estación base de la operadora móvil.



*Figura 10: Implementación de una femtocelda*

En estudios recientes se ha demostrado que más del 50% de las llamadas y más del 70% del tráfico de datos que se realizan mediante uso de dispositivos móviles se lleva a cabo desde zonas interiores, por lo que la implementación de las femtoceldas supone un aumento de la calidad y de la capacidad de los enlaces para la mayoría de los usuarios [5].

Por otro lado, con la implementación de las femtoceldas se reduce el número de usuarios a los que tienen que dar cobertura las macro y micro celdas, lo que conlleva que en exteriores también se aumente la calidad del servicio y se reduzca el tráfico de enlaces.

Hay que señalar que el objetivo de las femtoceldas no es sustituir a las celdas de mayor tamaño, si no de proporcionar una solución al problema de la calidad de servicios en interiores a la vez que convive con las demás celdas.

### **3.2 Ventajas del uso de femtoceldas**

En términos de comunicaciones móviles, la capacidad del enlace viene dada por la relación entre señal, ruido e interferencias (SINR, Signal to Interferences plus Noise Ratio). Existen multitud de factores que determinan el valor de la SINR, entre los que destacan: la potencia de la antena transmisora, el nivel y la cantidad de señales interferentes que afecten a la señal, el ruido que se acople a la señal procedente de diversas fuentes, las pérdidas de propagación que sufra la señal o su propio desvanecimiento. Por lo tanto, para obtener una buena SINR y por tanto alcanzar tasas binarias altas será necesario maximizar la potencia de la señal que reciba el usuario y minimizar el nivel de interferencias y ruido.

Con el uso de las femtoceldas, la distancia entre la estación base y el usuario se reduce considerablemente respecto a la existente entre el usuario y la macrocelda, por lo que la potencia que recibe el usuario en su terminal será mayor que la que reciba de la macrocelda, a pesar de que la femtocelda emita a más baja potencia.

Por otro lado, debido a esta emisión de baja potencia, la interferencia sobre la red de la macrocelda será baja. Desde el punto de vista contrario, la interferencia que provocará la señal de la macrocelda sobre la señal de la femtocelda también será baja debido a que dicha señal sufre pérdidas por propagación en exteriores y por penetración.

Gracias a estas dos características de las femtoceldas, se produce una mejora del nivel de SINR, lo que conlleva un aumento de la capacidad de enlace respecto a las macroceldas. Además, debido a que las femtoceldas dan servicio a un número reducido de usuarios, la calidad del servicio será mayor que la que ofrecen las macroceldas, ya que los recursos, como el ancho de banda o la potencia de



transmisión, son compartidos en los enlaces radioeléctricos, con lo que a menor número de usuarios más recursos para cada uno.

Como se ha comentado anteriormente, con el uso de las femtoceldas todo el tráfico correspondiente a las llamadas y al uso de datos en lugares cerrados será manejado por la red IP correspondiente, con lo que se producirá un aumento en la calidad del servicio ofrecido por las macroceldas, ocasionado también por el aumento del espectro utilizable. De esta manera, se producirá un incremento global en la capacidad de la red.

La implementación de femtoceldas implicaría la disminución del número de antenas emisoras de macroceldas en las ciudades, lo que supondría un ahorro para las operadoras de telefonía ya que el coste de usar y mantener una femtocelda es mucho menor que el de una macrocelda. En concreto, se está hablando de cifras de entorno 200\$ y 60.000\$ anuales respectivamente. También supondría un ahorro desde el punto de vista del usuario, ya que si la calidad del servicio es mayor, una tarifa de datos de menor velocidad podría dar los mismos servicios que una tarifa de datos de alta velocidad sin el uso de femtocelda, siendo la primera tarifa más económica que la segunda [5].

### **3.3 Arquitectura y aspectos técnicos**

Dado que la femtocelda se integra a la red mediante una conexión de banda ancha, hay que hablar del uso de dos tipos de redes: la móvil y la IP. Por lo tanto, es necesario que exista una buena calidad de servicio en la red IP para que la femtocelda pueda dar prestaciones de calidad. Es aquí donde entran en juego los operadores móviles y las compañías suministradores de ADSL, ya que el usuario que haga uso de la femtocelda no tiene por qué tener la misma compañía para las dos redes. Como la implementación y el uso de las femtoceldas es un tema en evolución todo depende de las compañías con las que se trate, pero en un principio se espera que los operadores móviles no necesiten un acuerdo previo para operar en la red del proveedor de ADSL.

Como cualquier tecnología relacionada con las comunicaciones móviles, las características técnicas que tiene que poseer las femtoceldas están publicadas por 3GPP pero, antes de mencionarlas, es necesario explicar la nomenclatura que se utiliza esta organización en este tema [6]:

- HNB “Home Node B”: es el término usado por 3GPP para referirse al punto de acceso de la femtocelda a la red IP. Este punto de acceso es el encargado de llevar a cabo el traspaso entre la red móvil y la red IP, de manera que el equipo local del usuario (UE) sirve como nodo para la red a través de la interfaz Uu (interfaz aérea) y se conecta a la red móvil mediante el uso de la interfaz Iuh.
- HNB-GW “Home NodeB Gateway”: es el término usado para describir la interfaz de punto de acceso femtocelda. Su función básica es agrupar un gran número de HNBs en un interfaz IuCS/IuPS, la cual introduce la información en la red IP.
- HMS “Home Node B Management System”: es el término usado para mencionar al nodo encargado de gestionar los recursos de los HNBs.

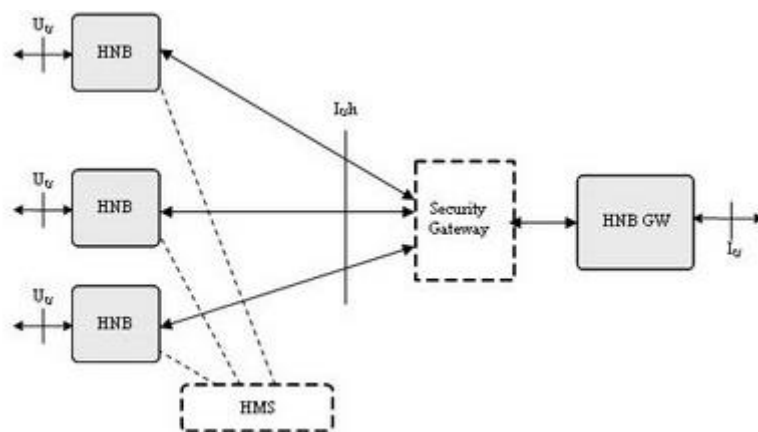


Figura 10: Arquitectura de conexiones de una femtocelda

En esta figura se muestra el funcionamiento en conjunto de los elementos descritos anteriormente. Los HNBs que están dentro del área de cobertura de la

femtocelda se conectan a la red IP a través del HNB-GW mediante la interfaz Iuh, que actúa como concentrador de todos los HNB. Como se puede observar, los HNB se conectan al HNB-GW mediante un nodo denominado *Security Gateway* que aporta seguridad en las transacciones. Además, 3GPP especifica IPsec en modo túnel como mecanismo de seguridad para conectarse a la red.

La conexión que realiza el HNB-GW a la red se lleva a cabo mediante la interfaz IuCS/IuPS, la cual permite que varios HNBs se conecten a la red mediante un sola interfaz. Esto es necesario ya que 3GPP y muchos operadores de red no consideran realizar cambios en el núcleo de la red IP para adaptarse a las femtoceldas.

A la hora de llevar a cabo el control de los usuarios que usan las femtoceldas, los protocolos de comunicación, principalmente RRC (Radio Resource Control), establecen un CGS (Closed Subscriber Groups) por cada usuario, de manera que estos puedan ser identificados dentro de la PLMN (Public Land Mobile Network) que usa la femtocelda.

Respecto a la comunicación que se lleva a cabo en las femtoceldas para el control de usuario, LTE introduce mejoras significativas tales que [7]:

- Un UE no está obligado a realizar la búsqueda de PLMNs o de CGSs de manera manual, siempre y cuando el estado del RRC sea de conectado. Si se quisiera realizar esta búsqueda manual, el UE puede realizar una liberación del estado del RRC sin desconectarlo.
- El identificador de CGS se difunde a todos los dispositivos que se encuentren en la red. Si dicho identificador se encuentra a *true*, el UE considera que el dispositivo pertenece al grupo de CGSs. Si no, se considerará que el dispositivo está en modo abierto o híbrido.
- Se definen nuevos protocolos RSRQ para solucionar el problema de la alta degradación de señal debida a interferencias que sufre un UE en

movimiento que se encuentre dentro de los límites de actuación de la femtocelda. Este nuevo protocolo añade métodos de idoneidad celular y criterios de búsqueda, de manera que en el caso de la señal degradada, se fuerce al UE a buscar otras frecuencias de operación y recuperar la calidad del servicio.

### 3.4 Estado del arte

A pesar de ser un tema en franco desarrollo, ya se pueden encontrar estudios sobre interferencias en señales de femtoceldas que usen LTE, aunque si nos fijamos en un ámbito más general como puede ser el uso de femtoceldas con tecnologías móviles de tercera generación, la variedad es mucho mayor.

Centrándonos en los trabajos que traten sobre femtoceldas de LTE, podemos encontrar:

- **“LTE Femtocell Roadmap From Concept to Reality”**: artículo donde se exponen las principales claves tecnológicas y empresariales que son requeridas para llevar a cabo una implementación realista de las femtoceldas de LTE. También se analiza el progreso requerido para poder llevar a cabo dicha implementación [8].
- **“Efficient Mobility Management in LTE Femtocell Network”**: Tesis Doctoral donde se estudian los algoritmos de decisión HO que utilizan las femtoceldas de LTE para llevar a cabo el *handover*. A partir de los algoritmos ya existentes se propone un nuevo algoritmo HO [9].
- **“Development of Technology to Control Radio Signal Interference for LTE Femtocell Base Stations to Achieve Stable Communications Quality Anywhere”**: artículo en el cual se describe que tecnología usar para paliar la disminución de la velocidad de transmisión de datos debida

al incremento de interferencias cuando el volumen de tráfico de datos aumenta considerablemente o debida a usuarios que transmiten gran cantidad de datos a través de femtoceldas [10].

- **“Handover Management Scheme in LTE Femtocells Networks”:** artículo en el que se expone una visión general de la arquitectura de las redes que utilizan las femtoceldas y donde se estudia el *handover* en diferentes escenarios de pruebas, siendo más específicos en la movilidad de usuarios de macroceldas a femtoceldas [11].
- **“Fast Handover in Cellular Networks with Femtocells”:** artículo en el que se propone una técnica *Prefecth-based Fast Handover* para solucionar los problemas introducidos por el uso de sistemas de datos que comparten tanto femtoceldas como macroceldas. [12]
- **“Macro and Femto Network Aspects for Realistic LTE Usage Scenarios with Interference Management”:** Tesis en la que se analiza el impacto del incremento de usuarios que actúen en lugares cerrados (hogares u oficinas) en la red de macroceldas en términos de capacidad de red. También se estudia la técnica de *Split spectrum* para conseguir reducir y manejar las interferencias entre las macroceldas y las femtoceldas [13].



## **4. INTERFERENCIAS Y TASA BINARIA**

Una vez explicados los aspectos teóricos de los dos elementos principales usados en este TFM, es necesario mostrar los pasos seguidos y los métodos utilizados para poder alcanzar los objetivos finales. Para ello, se definirán los diferentes modelos de propagación usados para modelar la señal, se realizará un análisis de las interferencias que influirán en los diferentes escenarios simulados, se mostrarán los aspectos teóricos de los niveles SNR (Signal to Noise Ratio) y SINR de la señal así como el cálculo de la tasa binaria para cada caso y por último se mostrará cómo se han obtenido los resultados finales.

### **4.1 Modelos de propagación**

Un modelo de propagación define los diferentes términos radioeléctricos y físicos que afectan e influyen en una señal desde su punto de origen hasta su destino. En el caso ideal, la señal emitida seguiría una trayectoria directa desde el emisor hasta el receptor y llegaría tal y como se ha emitido originalmente.

En la realidad, la señal se encuentra tanto con obstáculos físicos, como pueden ser personas o cualquier tipo de ente físico, como con obstáculos radioeléctricos que impiden que este escenario ideal se cumpla. Estos modelos de propagación tienen como objetivo definir una manera de calcular la señal que le llega al emisor teniendo en cuenta todos los aspectos que afectan a la señal, y se pueden basar en probabilidades o en estadísticas. Los basados en estadísticas son los más usados ya que permiten crear un modelo para cada escenario en el que actúa la señal, de manera que los resultados se adecuan más a la realidad.

En este Trabajo de Fin de Máster se han utilizado tres modelos de propagación para el cálculo final del nivel de SINR: el modelo de propagación en espacio libre, el modelo de multipared y el modelo Stanford University Interim. Estos tres modelos serán explicados a continuación.

### 4.1.1 Modelo de propagación en espacio libre

En las telecomunicaciones, las pérdidas de propagación en espacio libre se definen como la pérdida de potencia de señal de una onda electromagnética en un camino libre de obstáculos que puedan causar reflexión o refracción. La función que expresa las pérdidas por espacio libre se establece como la proporción del cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor, siendo también proporcional al cuadrado de la frecuencia de la señal:

$$L_{fs} = L_B + 20\log_{10}(d)_m$$

Dónde:

- $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor en m
- $L_B$  son las pérdidas a una distancia de referencia dada  $d_b$  que normalmente es 1 metro

$$L_B = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d_b}{\lambda}\right)$$

### 4.1.2 Modelo multipared

Para realizar el cálculo de capacidad en edificios que hacen uso de femtoceldas para dar cobertura a sus habitantes, se ha utilizado el modelo de propagación multipared (Multi-wall model) el cual tiene en cuenta las pérdidas por espacio libre vistas anteriormente y el número de paredes y suelos que atraviesa la señal en su trayecto desde la femtocelda al receptor. Hay que denotar que, si bien la función para calcular las pérdidas por atravesar paredes es la suma de la pérdida por cada pared, la función por atravesar suelos no es lineal y viene determinada por un factor  $b$  [5]:



$$L_p \text{ (dB)} = L_{fs} + \sum_{i=0}^I k_{wi} L_{wi} + k_f \left[ \frac{k_f+2}{k_f+1} b \right] L_f$$

Donde:

- $L_{fs}$  son las pérdidas por propagación en espacio libre
- $k_{wi}$  es el número de paredes atravesadas
- $k_f$  es el número de suelos atravesados
- $L_{wi}$  es la pérdida por la pared de tipo  $i$
- $L_f$  es la pérdida entre plantas consecutivas
- $b$  es un parámetro empírico de valor óptimo 0.46
- $i$  es el número de tipos de paredes

#### 4.1.3 Modelo Stanford University Interim (SUI)

Este modelo de propagación ha sido desarrollado por el grupo de trabajo de la Universidad de Stanford. Proviene de una extensión del modelo de Hata para permitir el trabajo con frecuencias mayores de 1900 MHz. En concreto, permite el cálculo para frecuencias de hasta 3.5 GHz, por lo que es adecuado para el uso de LTE [14].

En este modelo, la altura de la antena de la estación base puede estar entre 10 y 80 metros, mientras que la altura de la antena del receptor puede estar entre 2 y 10 metros. El radio de cobertura de la celda puede estar comprendido entre 0,1 Km hasta 8 Km. En el modelo se distinguen tres tipos de terreno donde puede llevarse a cabo la propagación: A, B y C.

El terreno A se puede usar para zonas montañosas con vegetación moderada o muy densa, de manera que es el terreno que presenta más pérdidas y se considera como el adecuado para simular una zona urbana con alta densidad de población. Los parámetros que caracterizan el terreno B describen zonas de más baja vegetación y montañas más pequeñas, por lo que es usado para zonas suburbanas. El terreno C es adecuado para terrenos planos o con vegetación ligera, por lo que se utiliza para simular zonas rurales con pocas pérdidas.

La función que describe las pérdidas de este modelo es:

$$PL = A + 10 \gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + S, \text{ para } d > d_0$$

Donde:

- $d$  es la distancia en metros entre la estación base y la antena receptora
- $d_0$  es la distancia de referencia, 100 metros.
- $\lambda$  es la longitud de onda
- $h_r$  es la altura de la antena receptora
- $h_b$  es la altura de la estación base
- $X_f$  es el factor de corrección para frecuencias mayores a 2 GHz y cuya expresión viene dada por la ecuación

$$X_f = 6.0 \log_{10} \left( \frac{f}{2000} \right), \quad f(\text{MHz})$$

- $X_h$  es el factor de corrección para la antena receptora. Sus expresiones son dependientes del terreno:

$$X_h = -10.8 \log_{10} \left( \frac{h_r}{2000} \right), \quad \text{para terrenos A ó B}$$

$$X_h = -20 \log_{10} \left( \frac{h_r}{2000} \right), \quad \text{para terreno C}$$

- A está definido como:

$$A = 20 \log_{10} \left( \frac{4 \pi d_0}{\lambda} \right)$$

- El factor de corrección por *shadowing*  $S$  y el exponente de pérdidas de propagación  $\gamma$  también son dependientes del terreno, y vienen determinados por la tabla:

$$\gamma = a - b h_b + \frac{c}{h_b}$$

Tabla 5: Parámetros del exponente de propagación y *shadowing*

Model parameter	Terrain A	Terrain B	Terrain C
$a$	4.6	4.0	3.6
$b \text{ (m}^{-1}\text{)}$	0.0075	0.0065	0.0050
$c \text{ (m)}$	12.6	17.1	20.0

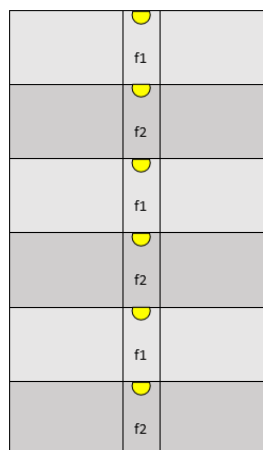
$$S = \min[12, 0.01(d - 100)]$$

## 4.2 Análisis de interferencias

Para este Trabajo de Fin de Máster se han tenido en cuenta tres tipos de interferencias: las que son producidas por femtoceldas del propio edificio en el que se encuentra el piso, las que son producidas por femtoceldas de otros edificios y las que son producidas por macroceldas. Hay que denotar que para que una señal interfiera con otra, tienen que estar operando a la misma frecuencia, por lo que a la hora de analizar las interferencias de las femtoceldas no se tendrán en cuenta aquellas que trabajen a otra frecuencia. De esta manera, sólo se han trabajado con 2 interferencias diferentes.

### 4.2.1 Interferencias intra-edificio

Las femtoceldas siguen una disposición intercalada dentro del mismo edificio, es decir, que las frecuencias se repiten cada dos plantas. Esta disposición es con la que se obtiene menor interferencias intra-edificio por cada planta ya que las femtoceldas que utilizan la misma frecuencia están distribuidas de manera equidistante y, como se ha visto en el punto de modelos de propagación, las pérdidas por propagación en espacio libre son mayores cuanto mayor es la distancia, de manera que cuanto más se separen las zonas de cobertura de femtoceldas que utilicen la misma frecuencia, menor será la interferencia.

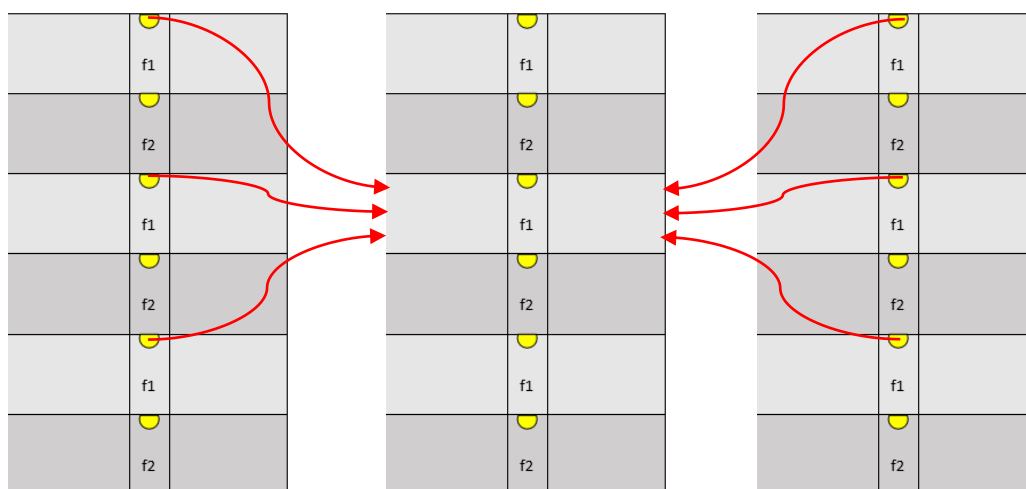


*Figura 11: Esquema de interferencias intra-edificio*

### 4.2.2 Interferencias inter-edificios

A la hora de analizar las interferencias provocadas por femtoceldas situadas en diferentes edificios, la idea es la misma que para el caso de un solo edificio. Así, cuanto más lejos esté la femtocelda interferente de la transmisora, menor será la interferencia provocada. En la siguiente figura se observa el escenario de simulación que se ha utilizado para analizar las interferencias inter-edificios, aunque las señales interferentes mostradas solo pertenecen a un caso concreto de este escenario, ya que cada planta que utiliza la frecuencia  $f1$  interfiere con todas las de su misma frecuencia, al igual que  $f2$ .

La planta de la figura que sufre las interferencias es, a priori, la que menos nivel de SINR va a tener dado que, de todas las plantas, es la que tiene, de media, más cerca todas las fuentes de interferencia.



*Figura 12: Esquema de interferencias inter-edificio*

También se podría contemplar el escenario en el que los edificios laterales tuviesen una disposición inversa de las frecuencias, es decir, que la primera planta operase con  $f1$  en vez de con  $f2$  y así sucesivamente. En este escenario, el nivel de interferencias por planta sería aun menor ya que la distancia media aumenta, por lo que es de mayor interés estudiar el escenario del caso mostrado para ver si, con niveles menores de SINR, se cumple una cierta calidad de servicio.

### 4.2.3 Interferencias edificio-macrocela

Para estudiar las interferencias que provoca una macrocelda en un área cubierta por una femtocelda se ha establecido un escenario en el que la señal emitida por la macrocelda incide directamente sobre los edificios bajo estudio. Dado que nosotros vamos a trabajar con 3 edificios, esta macrocelda estará situada al norte de los edificios y alineada con el centro del edificio central, de tal manera que quede un esquema de radiación simétrica. Con esta disposición maximizaremos los niveles de señal interferente en nuestro entorno.

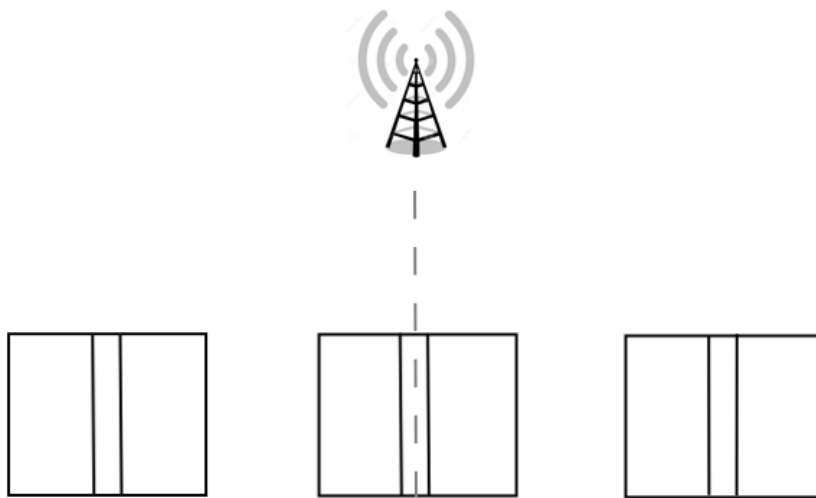


Figura 13: Esquema de interferencias macrocelda-edificio

## 4.3 SNR

*Signal-to-Noise-Ratio* expresa la relación existente entre la potencia de una señal y el ruido que afecta a dicha señal. Se utiliza para establecer un umbral mínimo a partir del cual el receptor será capaz de discernir entre la señal a recibir y el ruido acoplado.

$$SNR = \frac{P_{señal}}{P_{ruido}}$$

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{señal}}{P_{ruido}} \right) = P_{señal,dBm} - P_{ruido,dBm}$$

El nivel de SNR está directamente relacionado con el ancho de banda y con la capacidad de canal mediante el teorema de Shannon-Hartley:

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

Dónde:

- $C$  es la capacidad de canal
- $B$  es el ancho de banda
- $S$  es el nivel de señal
- $N$  es el nivel de ruido

## 4.4 SINR

*Signal to Interferences plus Noise Ratio* expresa la relación entre la potencia de la señal, las interferencias que sufre y el ruido que se le acopla. Es una medida muy utilizada en comunicaciones inalámbricas ya que este tipo de comunicaciones sufre muchas interferencias, por lo que una medida únicamente de SNR no sería adecuada para determinar el nivel de señal en el receptor y poder extraer la señal transmitida. La idea es añadir las diferentes señales interferentes a la ecuación que describe el SNR. Hay que destacar que todas las medidas deben tomarse en el mismo punto del sistema y con el mismo ancho de banda.

$$SINR = \frac{P_{señal}}{P_{ruido} + P_{interf}}$$

$$\begin{aligned}
 SINR_{dB} &= 10 \log_{10} \left( \frac{P_{señal}}{P_{ruido} + P_{interf}} \right) \\
 &= P_{señal,dBm} - 10 \log_{10}(P_{ruido,mW} + P_{interf,mW})
 \end{aligned}$$

## 4.5 Fórmula de Friis

La fórmula de Friis permite calcular la potencia de señal recibida teniendo en cuenta tanto los parámetros de las antenas transmisoras y receptoras como las pérdidas y atenuaciones sufridas durante el trayecto de la señal. Para poder entenderla, se explicará paso a paso.

Considerando que tenemos una antena adaptada, la potencia recibida vendrá dada en función de la densidad de potencia  $\Phi$  a una distancia  $d$  y del área efectiva  $A_E$  de la antena receptora.

$$P_{Rx} = \Phi A_E$$

El área efectiva de una antena viene dada en función del área efectiva de la antena isótropa y de la ganancia sobre ésta.

$$A_E = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

Si unimos ambas expresiones, nos queda que la potencia recibida tiene la siguiente expresión.

$$P_{Rx} = \frac{E^2}{120\pi} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{Rx}$$

Si suponemos que estamos en espacio libre y sustituimos la expresión del campo eléctrico en función de la potencia transmitida, nos encontramos con la fórmula que describe la propagación de la onda.



$$P_{Rx} = P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Si a esta ecuación se le añade el efecto provocado por la reflexión que se produce cuando las antenas no tienen una adaptación perfecta, las pérdidas de polarización y las pérdidas por otros factores, se obtiene la fórmula de Friis.

$$P_{Rx} = P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} L_c \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 (1 - |\rho_{Tx}|^2) (1 - |\rho_{Rx}|^2) |\hat{e}_{Tx} \hat{e}_{Rx}|^2$$

Dónde:

- $P_{Tx}$  es la potencia de la onda del transmisor
- $G_{Tx}$  es la ganancia de la antena transmisora
- $G_{Rx}$  es la ganancia de la antena receptora
- $L_c$  es el factor de pérdidas
- $\left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$  son las pérdidas por propagación en espacio libre
- $(1 - |\rho_{Tx}|^2)$  son las pérdidas por desadaptación en la antena transmisora
- $(1 - |\rho_{Rx}|^2)$  son las pérdidas por desadaptación en la antena receptora
- $|\hat{e}_{Tx} \hat{e}_{Rx}|^2$  es el factor de pérdidas por polarización

## 4.6 Tasa Binaria

Para establecer la tasa binaria, se realiza una ampliación de la tabla MCS mostrada en el punto 2.3.2 de esta memoria. En esta nueva tabla se muestra la

relación existente entre cada una de las modulaciones mostradas en el MCS y su tasa de codificación, obteniendo así la tasa binaria esperada para cada modulación.

También se ha establecido un nivel de SINR mínimo por cada MCS, de manera que para una modulación dada, cada MCS marcará una nueva eficiencia en la tasa de codificación que se aplica. De esta manera, cada modulación se combina con su tasa de codificación para determinar hasta en condiciones se da una tasa binaria y un cierto SINR [4].

Tabla 6: Tasa binaria y SINR mínimo por MCS

MCS	Modulación	Orden de la modulación	Tasa de codificación	Tasa binaria en sector (Mbps/Hz)	SINR (dB)
0					<-3.4
1	QPSK	2	0.17	0.34	-3.4
2	QPSK	2	0.23	0.46	-2.3
3	QPSK	2	0.29	0.58	-1.4
4	QPSK	2	0.36	0.72	-0.4
5	QPSK	2	0.45	0.9	0.8
6	QPSK	2	0.55	1.1	2.7
7	QPSK	2	0.64	1.28	5.3
8	16QAM	4	0.5	2	6.8
9	16QAM	4	0.55	2.2	7.5
10	16QAM	4	0.62	2.48	8.5
11	16QAM	4	0.72	2.88	10
12	16QAM	4	0.8	3.2	11.4
13	64QAM	6	0.64	3.84	14
14	64QAM	6	0.68	4.08	14.5
15	64QAM	6	0.76	4.56	15.8
16	64QAM	6	0.82	4.92	17.1
17	64QAM	6	0.91	5.46	19.8

Por otro lado, hay que tener en cuenta que las multiplexaciones que usa LTE pueden afectar al valor de tasa binaria bruta. Como se explicó en el punto 2.3.4, LTE utiliza dos tipos de multiplexación: TDD y FDD. Aunque ambas son *full-duplex*, es decir, permiten el uso de dos canales de comunicación a la vez, únicamente FDD realiza una multiplexación de espectro equitativo asignado todo el ancho de banda tanto para el enlace *uplink* como para el enlace *downlink*, mientras que TDD divide el ancho de banda y asigna cada parte a cada enlace.

Esto afecta directamente a la tasa binaria bruta ya que si se divide el ancho de banda, dicha tasa también lo hará. El tipo de multiplexación usada depende directamente de la frecuencia a la que se opere. En nuestro caso, dicha frecuencia es de 2.6 GHz, por lo que la multiplexación usada será de FDD, como se observa en la siguiente tabla.

*Tabla 7: Multiplexación usada para cada banda*

Band	FDD/TDD
<b>700MHz</b>	<b>FDD</b>
<b>800MHz</b>	<b>FDD</b>
<b>900MHz</b>	<b>FDD</b>
<b>1800MHz</b>	<b>FDD</b>
<b>2100MHz</b>	<b>FDD</b>
<b>2600MHz</b>	<b>FDD</b>
<b>2300MHz</b>	<b>TDD</b>
<b>2600MHz</b>	<b>TDD</b>

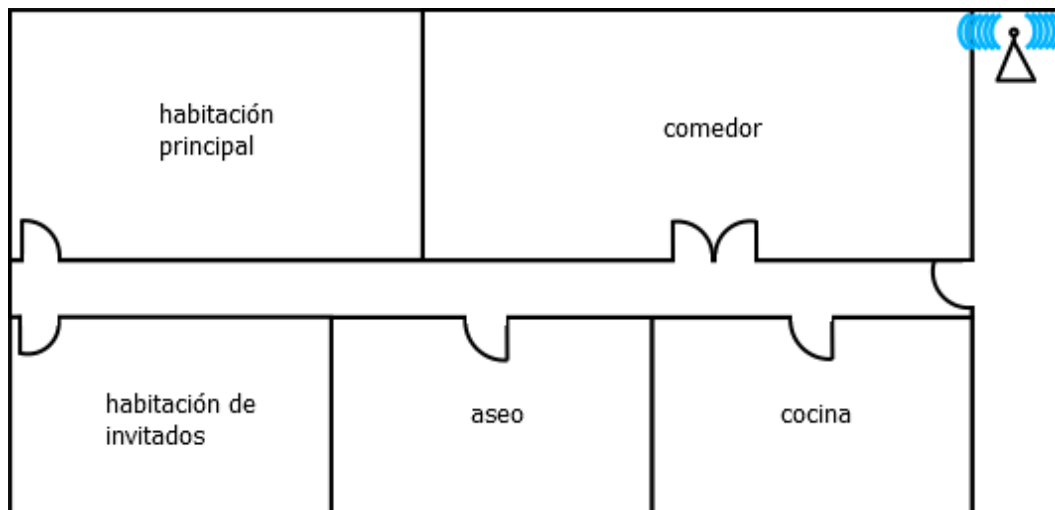
A la hora de obtener la tasa binaria neta, también debemos tener en cuenta el denominado *Prefijo Cíclico*. Este método consiste en añadir símbolos los últimos símbolos de la subportadora transmitida en la siguiente subportadora, de manera que queden duplicados. Con esto se consigue crear un intervalo el cual actúa como un seguro, evitando errores entre símbolos y preservando la ortogonalidad que deben tener la subportadoras en transmisiones de tipo OFDM.

Como contrapartida, el CP prolonga la duración de la portadora, disminuyendo así la tasa binaria que se podría conseguir con el ancho de banda. Normalmente es un 10% del ancho de banda el que se dedica al prefijo cíclico, por lo que a la hora de llevar a cabo las simulaciones habrá que tenerlo en cuenta.

## 4.7 Parámetros de simulación

Como se ha expuesto anteriormente, el estudio de las interferencias se realizará sobre un piso de 5 habitaciones y un pasillo. Habrá dos pisos por planta separados por una escalera central y 6 plantas por edificio. La femtocelda estará situada en el techo de un extremo de la escalera central, de manera que proporcione la misma cobertura a los dos pisos de cada planta.

En la figura se muestra una vista en alzado del piso de la izquierda de una planta, con la femtocelda colindando con el comedor. Cabe destacar que los pisos son simétricos horizontalmente, de manera que el piso de la derecha, que no se muestra en la figura, también tendría el comedor pegado a la femtocelda.



*Figura 14: Plano del piso*

En la siguiente tabla se muestran los principales parámetros que se han considerado para la simulación de este Trabajo de Fin de Máster. Hay que tener en cuenta que varios de los parámetros mostrados se pueden variar para obtener otros resultados, pero en este TFM se han usado los que se han considerado adecuados para simular el escenario peor en cuanto a nivel de interferencias se refiere.

Tabla 8: Parámetros de simulación

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
$f$	2.6	GHz
$P_{Tx}$	10-100	mW
$P_{Tx\_Macroelda}$	20	W
$G_{Tx} (femto)$	0-3	dB
$G_{Rx} (femto)$	0	dB
$G_{Tx} (macroelda)$	$15 > G_{Tx} > -5$	dB
$WB$	20	MHz
$NF$	7	dB
$Altura\ piso$	3	m
$Altura\ usuario$	1.5	m
$Longitud\ edificio\ (eje\ x)$	20	m
$Anchura\ edificio\ (eje\ y)$	10	m
$Distancia\ entre\ edificios$	10	m
$Shadowing$	6	dB
$L_{pared}$	6.9	dB
$L_{suelo}$	18	dB
$L_{fachada}$	17	dB

## 4.8 Ganancia de la antena transmisora de la macrocelda y potencia de ruido

El diagrama de radiación de la antena de la macrocelda tiene un haz principal en vertical apuntando según la dirección en la que esté situada la antena, por lo que la ganancia dependerá directamente del ángulo de apuntamiento de la antena. De esta manera, los elementos que se encuentren situados justo en frente de la antena recibirán el máximo de radiación, mientras que cuanto más alejados, en horizontal, estén de la antena, menor nivel de señal les llegarán.

Esta ganancia se modela según la siguiente ecuación:

$$G_{Tx} = \max \left[ 15 - 12 \left( \frac{\theta}{8} \right)^2, -5 \right]$$

Dónde:

- $\theta$  es el ángulo formado por el haz principal de la antena y el punto bajo estudio, en horizontal.

Por otro lado, es necesario definir la potencia de ruido:

$$N_{dB} = -114 + 10 \log_{10}(Bw) + NF$$

Dónde:

- $Bw$  es el ancho de banda.
- $NF$  es el factor de ruido.

## 4.9 Explicación del programa de análisis

En esta sección se va a proceder a la explicación del código implementado en la herramienta de simulación Matlab para la obtención del nivel de SINR y de tasa binaria. En particular, se va a explicar el código correspondiente al escenario en el que coexisten 3 edificios de 6 plantas, cada una con su femtocelda, y una macrocelda situada a 10 metros de los edificios, ya que es el escenario que más potencia interferente recibe.

Por otro lado, dado que cada edificio tiene 3 plantas que comparten frecuencia de operación, se va a mostrar el código correspondiente a la planta de en medio que, a priori, es la que va a sufrir más interferencias. En el apartado de resultados se mostrarán todas las gráficas obtenidas de todos los diferentes escenarios de estudio.

Para comenzar el programa de análisis, hay que introducir todos los parámetros generales que vamos a utilizar durante toda la simulación, entre los que se encuentran la frecuencia de operación, el ancho de banda, la potencia de transmisión de la femtocelda, las ganancias de las antenas transmisora y receptora, el factor de ruido y las pérdidas por *shadowing*:

### %%CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

```
f = 2.6; % GHz
lambda = 0.3/f; % m
Ancho_banda = 20*0.9; % MHz (banda real)
Ptx = 0.001; % W Femtocelda->200mW
Ptx = 10*log10(Ptx); % dBW
Ptx = 30 + Ptx; % dBm
Gtx = 3; % dB 0 o 3 dB
Grx = 0; % dB
NF = 7;
Shd=6; % 5 o 4
```

Como se puede observar, al ancho de banda de 20 MHz se le ha sustraído el 10%, ya que en esa banda no se transmite para no solapar con otras bandas de frecuencia. También se han hecho las oportunas conversiones para transformar la potencia de transmisión de milivatios a decibelios/metro. A partir de la figura de ruido, se ha calculado la potencia de ruido a través de la siguiente expresión:

$$N = -114 + 10 \cdot \log_{10}(\text{Ancho\_banda}) + NF; \quad \% \text{ dB}$$

Una vez definidos los principales aspectos radioeléctricos, se han implementado las medidas físicas que va a tener el edificio y el piso simulados, entre las que se encuentran la altura del piso, la altura del usuario, la anchura del edificio, la longitud del edificio y el tamaño del hueco del rellano y de las escaleras (donde estará situada la femtocelda):

#### %%CARACTERISTICAS DEL ENTORNO

```
Altura_piso=3;           %m
Altura_usuario=1.5;      %m
Anchura_edificio=10;     %m
Long_edificio=20;        %m
Long_esc=2;              %m
Long_piso=Long_edificio/2-Long_esc/2; %m
dim_piso= dimension_piso(Anchura_edificio,Long_piso);
paso=0.05;
```

Como se puede observar, para establecer las dimensiones concretas del piso, se llama a función denominada *dimension\_piso*. Dicha función tendrá como retorno una matriz de tamaño 6x2, cuyas filas corresponderán al número de habitaciones (contando el pasillo) y cuyas columnas corresponderán al ancho de la habitación (eje y) y al largo (eje x) correspondientemente. Esta función esta detallada en el anexo II.A.

Para el estudio del nivel señal y de interferencias, se ha dividido las habitaciones en celdas de un tamaño de  $0.05 \text{ m}^2$ , calculando dicho nivel en el centro de cada una de ellas. Esta división se ha establecido mediante la creación de vectores de



posición para cada una de las habitaciones, de manera que exista un vector x y un vector y, para cada habitación, que determinen en qué punto de la habitación se está calculando el nivel señal en cada momento:

**%%VECTORES DE HABITACIONES**

```
x1=[paso/2:paso:dim_piso(1,2)-paso/2];
```

```
x1=[0 x1];
```

```
y1=[paso/2:paso:dim_piso(1,1)-paso/2];
```

```
y1=[0 y1];
```

```
x2=dim_piso(1,2)+[paso/2:paso:dim_piso(2,2)-paso/2];
```

```
x2=[x2 Long_piso];
```

```
y2=[paso/2:paso:dim_piso(2,1)-paso/2];
```

```
y2=[0 y2];
```

```
x3=[paso/2:paso:dim_piso(3,2)-paso/2];
```

```
x3=[0 x3 Long_piso];
```

```
y3=dim_piso(2,1)+[paso/2:paso:dim_piso(3,1)-paso/2];
```

```
x4=[paso/2:paso:dim_piso(4,2)-paso/2];
```

```
x4=[0 x4];
```

```
y4=dim_piso(2,1)+dim_piso(3,1)+[paso/2:paso:dim_piso(4,1)-paso/2];
```

```
y4=[y4 Anchura_edificio];
```

```
x5=dim_piso(4,2)+[paso/2:paso:dim_piso(5,2)-paso/2];
```

```
y5=dim_piso(2,1)+dim_piso(3,1)+[paso/2:paso:dim_piso(5,1)-paso/2];
```

```
y5=[y5 Anchura_edificio];
```

```
x6=dim_piso(4,2)+dim_piso(5,2)+[paso/2:paso:dim_piso(6,2)-paso/2];
```

```
x6=[x6 Long_piso];
```

```
y6=dim_piso(2,1)+dim_piso(3,1)+[paso/2:paso:dim_piso(6,1)-paso/2];
```

```
y6=[y6 Anchura_edificio];
```

Como se ha explicado, la SINR establece una relación entre el nivel de señal, el ruido y las interferencias en un punto concreto, por lo que para poder calcularla se

necesita obtener cada uno de los elementos anteriores de manera individual, aunque la potencia de ruido será la misma para todos los puntos.

Lo primero que se ha calculado es el nivel de señal transmitida que llega al receptor, teniendo en cuenta tanto las pérdidas por propagación en espacio libre como las atenuaciones sufridas por paredes o suelos, mediante la fórmula de Friis descrita en el apartado 4.5 de esta memoria. En nuestro caso, consideraremos que no existen pérdidas por polarización y que las antenas están perfectamente adaptadas. Comenzando por la habitación principal, se definen el número de paredes y suelos que atraviesa la onda para llegar a esta habitación. En este caso, la señal atraviesa 2 paredes.

Posteriormente, se comienzan a recorrer los vectores de posición correspondientes a dicha habitación. Por cada celda, se calcula la distancia de su punto medio hasta la femtocelda mediante el uso doble de la ecuación de Pitágoras, primero para calcular la distancia en el plano  $xy$  y después para obtenerla en el plano  $xyz$ . Hay que recordar que se está considerando que el usuario está haciendo uso de su dispositivo móvil a una altura de 1.5 metros, por lo que todos los niveles de señal calculados están a esa altura.

A continuación, se calculan las pérdidas totales que sufre la señal de la femtocelda teniendo en cuenta la longitud de onda, la distancia, el número de paredes y plantas y el factor de *shadowing*. Hay que denotar que estas pérdidas se calculan mediante la función  $L_{totales}$ , descrita en el anexo II.B. Esta función tiene en cuenta tanto las pérdidas por propagación en espacio libre como las atenuaciones sufridas por paredes y suelos. Por último, se calcula el nivel de señal haciendo uso de la fórmula de Friis anteriormente mencionada:

```
%Habitacion 1
```

```
Kf=0; %numero de plantas distantes
```

```
Kp=2; %numero de paredes distantes
```

```
for k=1:length(y1)
```

```

for t=1:length(x1)
    d_xy=sqrt((Long_esc/2+Long_piso-x1(t))^2+y1(k)^2); %distancia en plano xy
    d=sqrt(d_xy^2+(Altura_piso-Altura_usuario)^2);
    L_tot= L_totales(lambda,d,Kf,Kp,Shd);
    Srx1(k,t)=Ptx+Gtx+Grx-L_tot;
end
end

```

El cálculo de nivel de señal en las otras habitaciones del piso se realizará de manera similar, variando el número de paredes que atraviese la señal y los vectores de posición correspondientes a cada habitación. El caso del pasillo será particular, ya que a la mitad de él la señal pasará de atravesar 3 paredes a atravesar 2. Hay que tener en cuenta que para cada señal el número de obstáculos físicos que atraviese será diferente, por lo que habrá que cambiar estos parámetros para cada simulación que se quiera realizar.

En el escenario que se está describiendo, hay 9 fuentes de interferencias: 8 provocadas por femtoceldas que usan la misma frecuencia (2 del mismo edificio y 6 de los edificios colindantes) y la interferencia provocada por la macrocelda. Para el cálculo de las interferencias provocadas por las femtoceldas, la operativa es similar a la utilizada para el cálculo del nivel de señal, ya que al fin y al cabo son ondas de la misma índole.

Las principales diferencias se encuentran en que las interferencias también atravesarán fachadas, las cuales provocan una atenuación mayor que las paredes, y que las femtoceldas que se encuentre en una posición superior a la femtocelda transmisora actuarán con una ganancia de 3 dB, mientras que las que se encuentren en una posición inferior lo harán con una ganancia de 0 dB.

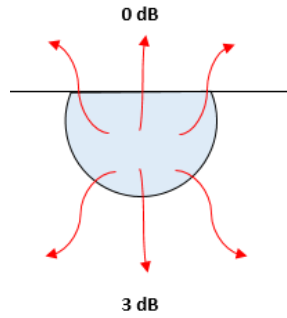


Figura 15: Ganancia de la antena Tx de la femtocelda

Al igual que con el nivel de señal, las interferencias se calcularán por cada punto de la habitación. A continuación se muestra un ejemplo de una femtocelda interferente correspondiente al piso 6 del edificio de la izquierda:

%%INTERFERENCIA EDIFICIO IZQUIERDA PISO SUPERIOR

%Habitacion 1

```
Kf=2;           %numero de plantas distantes
Kp=2;           %numero de paredes distantes
Gtx=3;          %dB
L_fachada= 10;  %dB

for k=1:length(y1)
for t=1:length(x1)
d_xy=sqrt((Long_esc/2+Long_piso+d_edificios+x1(t))^2+y1(k)^2); %distancia en
plano xy
d=sqrt(d_xy^2+((Kf-1)*Altura_piso+Altura_usuario)^2);
L_tot= L_totales(lambda,d,Kf,Kp,Shd)+L_fachada*2;
Icc4_1(k,t)=Ptx+Gtx+Grx-L_tot;
end
end
```

Para calcular la señal interferente provocada por la macrocelda, se hará uso del modelo de pérdidas Stanford University Interim (SUI), descrito en la sección 4.1.3. Hay que destacar que este modelo sólo se usará para distancias mayores a

100 metros entre macrocelda y femtocelda. Para distancias menores, se usará el modelo de propagación por espacio libre.

Primero se definirán todos los parámetros relacionados con la estación base correspondiente a la macrocelda, entre los que se encuentran la altura de la estación base, el parámetro que establece nuestro escenario como un entorno urbano (necesario para el modelo de pérdidas) y la potencia de la onda transmitida por la macrocelda:

```
%%INTERFERENCIA MACROCELDA
```

```
h_macroelda=30;    %m
```

```
model_param=1;
```

```
d_macroelda=500;  %m
```

```
Ptx_macroelda=20; % W
```

```
Ptx_macroelda=10*log10(Ptx_macroelda); % dBW
```

```
Ptx_macroelda=30+Ptx_macroelda;      % dBm
```

Posteriormente calcularemos el nivel de interferencia por cada habitación del piso de manera parecida al cálculo de nivel de señal, pero modificando la manera de calcular la distancia e introduciendo las nuevas pérdidas con la función *L\_macroelda*, la cual también tiene hace uso del modelo multipared, detallada en el anexo II.D:

```
%Habitacion 1
```

```
Kf=1; %numero de plantas distantes
```

```
Kp=1; %numero de paredes distantes
```

```
for k=1:length(y1)
```

```
    for t=1:length(x1)
```

```
        x_macro=Long_esc/2+Long_piso-x1(t);
```

```
        y_macro=d_macroelda+y1(k);
```

```
        d_xy_macro=sqrt(x_macro^2+y_macro^2);
```

```
        hr=(h_macroelda-3*Altura_piso-Altura_usuario);
```

```
        d_macro=sqrt(d_xy_macro^2+hr^2);
```

```

theta=atand(x_macro/(d_macroelda));
Gtx=max(15-12*((theta/8)^2),-5);

L_tot=L_macroelda(d_macro,f,model_param,hr,h_macroelda,Kf,Kp,Shd)+L_fach
ada;
Icc9_1(k,t)=Ptx_macroelda+Gtx+Grx-L_tot;
end
end

```

Una vez obtenidos tanto el nivel de señal como el nivel de interferencias para cada punto del piso, se calcula la SINR. Dado que todos los valores que hemos obtenido han sido en dB, lo primero que habrá que hacer será pasar dichos valores a naturales para poder operar con ellos y posteriormente volver a convertir el resultado a dB. Tanto la función que convierte de dB a naturales como la que realiza la operación inversa están descritas en el anexo II.C. Ya con el nivel de SINR obtenido para cada habitación del piso se construirá una matriz que contenga todos los valores para poder representar el SINR en conjunto:

#### %%CALCULO DE SINR

```

SINR1=dBtoNat(Srx1)./(dBtoNat(N)+dBtoNat(Icc1_1)+dBtoNat(Icc2_1)+dBtoNat(Icc3_1)+dBtoNat(Icc4_1)+dBtoNat(Icc5_1)+dBtoNat(Icc6_1)+dBtoNat(Icc7_1)+dBtoNat(Icc8_1)+dBtoNat(Icc9_1));

SINR2=dBtoNat(Srx2)./(dBtoNat(N)+dBtoNat(Icc1_2)+dBtoNat(Icc2_2)+dBtoNat(Icc3_2)+dBtoNat(Icc4_2)+dBtoNat(Icc5_2)+dBtoNat(Icc6_2)+dBtoNat(Icc7_2)+dBtoNat(Icc8_2)+dBtoNat(Icc9_2));

SINR3=dBtoNat(Srx3)./(dBtoNat(N)+dBtoNat(Icc1_3)+dBtoNat(Icc2_3)+dBtoNat(Icc3_3)+dBtoNat(Icc4_3)+dBtoNat(Icc5_3)+dBtoNat(Icc6_3)+dBtoNat(Icc7_3)+dBtoNat(Icc8_3)+dBtoNat(Icc9_3));

SINR4=dBtoNat(Srx4)./(dBtoNat(N)+dBtoNat(Icc1_4)+dBtoNat(Icc2_4)+dBtoNat(Icc3_4)+dBtoNat(Icc4_4)+dBtoNat(Icc5_4)+dBtoNat(Icc6_4)+dBtoNat(Icc7_4)+dBtoNat(Icc8_4)+dBtoNat(Icc9_4));

```

```
SINR5=dBtoNat(Srx5)./(dBtoNat(N)+dBtoNat(Icc1_5)+dBtoNat(Icc2_5)+dBtoNat(Icc3_5)+dBtoNat(Icc4_5)+dBtoNat(Icc5_5)+dBtoNat(Icc6_5)+dBtoNat(Icc7_5)+dBtoNat(Icc8_5)+dBtoNat(Icc9_5));
```

```
SINR6=dBtoNat(Srx6)./(dBtoNat(N)+dBtoNat(Icc1_6)+dBtoNat(Icc2_6)+dBtoNat(Icc3_6)+dBtoNat(Icc4_6)+dBtoNat(Icc5_6)+dBtoNat(Icc6_6)+dBtoNat(Icc7_6)+dBtoNat(Icc8_6)+dBtoNat(Icc9_6));
```

```
SINR1_dB=NattodB(SINR1);
```

```
SINR2_dB=NattodB(SINR2);
```

```
SINR3_dB=NattodB(SINR3);
```

```
SINR4_dB=NattodB(SINR4);
```

```
SINR5_dB=NattodB(SINR5);
```

```
SINR6_dB=NattodB(SINR6);
```

```
SINR_matrix=[SINR1_dB SINR2_dB;SINR3_dB;SINR4_dB SINR5_dB SINR6_dB];
```

Una vez obtenido el nivel de SINR, se calcula la tasa binaria para cada celda. Para realizar este cálculo nos basamos en la tabla descrita en el punto 4.6, de manera que dependiendo del nivel de SINR obtenido, será posible disponer de una tasa binaria menor o mayor. Para calcular la tasa binaria, se ha creado una función de Matlab dependiente del SINR y del ancho de banda con el que se esté trabajando:

```
function tasa_binaria= Tasa_binaria (SINR,Ancho_banda_nominal)
```

```
[filas col]=size(SINR);
```

```
for k=1:filas
```

```
    for t=1:col
```

```
        if SINR(k,t) < -3.4
```

```
            tasa_binaria(k,t) = 0;
```

```
        elseif SINR(k,t) < -2.3
```

```
            tasa_binaria(k,t) = 0.34*Ancho_banda_nominal;
```

```
        elseif SINR(k,t) < -1.4
```

```
            tasa_binaria(k,t) = 0.46*Ancho_banda_nominal;
```

```
        elseif SINR(k,t) < -0.4
```

```

    tasa_binaria(k,t) = 0.58*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 0.8
    tasa_binaria(k,t) = 0.72*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 2.7
    tasa_binaria(k,t) = 0.90*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 5.3
    tasa_binaria(k,t) = 1.1*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 6.8
    tasa_binaria(k,t) = 1.28*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 7.5
    tasa_binaria(k,t) = 2*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 8.5
    tasa_binaria(k,t) = 2.2*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 10
    tasa_binaria(k,t) = 2.48*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 11.4
    tasa_binaria(k,t) = 2.88*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 14
    tasa_binaria(k,t) = 3.2*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 14.5
    tasa_binaria(k,t) = 3.84*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 15.8
    tasa_binaria(k,t) = 4.08*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 17.1
    tasa_binaria(k,t) = 4.56*Ancho_banda_nominal;
elseif SINR(k,t) < 19.8
    tasa_binaria(k,t) = 4.92*Ancho_banda_nominal;
else
    tasa_binaria(k,t) = 5.46*Ancho_banda_nominal;
end
end
end

```



## 5. RESULTADOS

El piso mostrado en las gráficas corresponde al piso izquierdo de la planta simulada, teniendo en cuenta que cada planta tiene dos pisos. Por cada planta simulada, se muestran el nivel de SINR y de tasa binaria así como la función de distribución acumulada para ambos, la cual nos permite ver como se distribuyen los diferentes valores que han tomado las gráficas.

Únicamente se ha simulado un edificio lateral ya que se considera que los resultados son iguales para ambos edificios laterales debido a su disposición simétrica respecto al central.

Hay que mencionar que algunos de los resultados obtenidos para los escenarios en los que hay macroceldas a menos de 100 metros han sido simulados con una potencia de femtocelda de 100 mW, por motivos que se explicarán posteriormente.

### 5.1 Escenarios

En esta sección se muestran los diferentes resultados obtenidos para los siguientes escenarios de simulación:

- Escenario A: Un único edificio de 6 plantas con frecuencias repetidas dos a dos. La planta superior corresponderá el escenario A.1, la planta del medio al A.2 y la planta inferior al A.3.
- Escenario B: Tres edificios de 6 plantas con frecuencias repetidas dos a dos. Resultados para el edificio central. La planta superior corresponderá el escenario B.1, la planta del medio al B.2 y la planta inferior al B.3
- Escenario C: Tres edificios de 6 plantas con frecuencias repetidas dos a dos. Resultados para uno de los edificios laterales. La planta superior

corresponderá el escenario C.1, la planta del medio al C.2 y la planta inferior al C.3.

- Escenario D: Tres edificios de 6 plantas con frecuencias repetidas dos a dos más interferencias por macrocelda a 10, 50, 100, 250 y 500 metros. Resultados para el edificio central. La planta superior corresponderá el escenario D.1, la planta del medio al D.2 y la planta inferior al D.3, y cada una de ellas irá seguida de un indicador que muestre la distancia a la que se encuentra la macrocelda en cada escenario.
- Escenario E: Tres edificios de 6 plantas con frecuencias repetidas dos a dos más interferencias por macrocelda a 10, 50, 100, 250 y 500 metros. Resultados para uno de los edificios laterales. La planta superior corresponderá el escenario E.1, la planta del medio al E.2 y la planta inferior al E.3, y cada una de ellas irá seguida de un indicador que muestre la distancia a la que se encuentra la macrocelda en cada escenario.

## 5.2 Edificio único

### 5.2.1 Planta superior

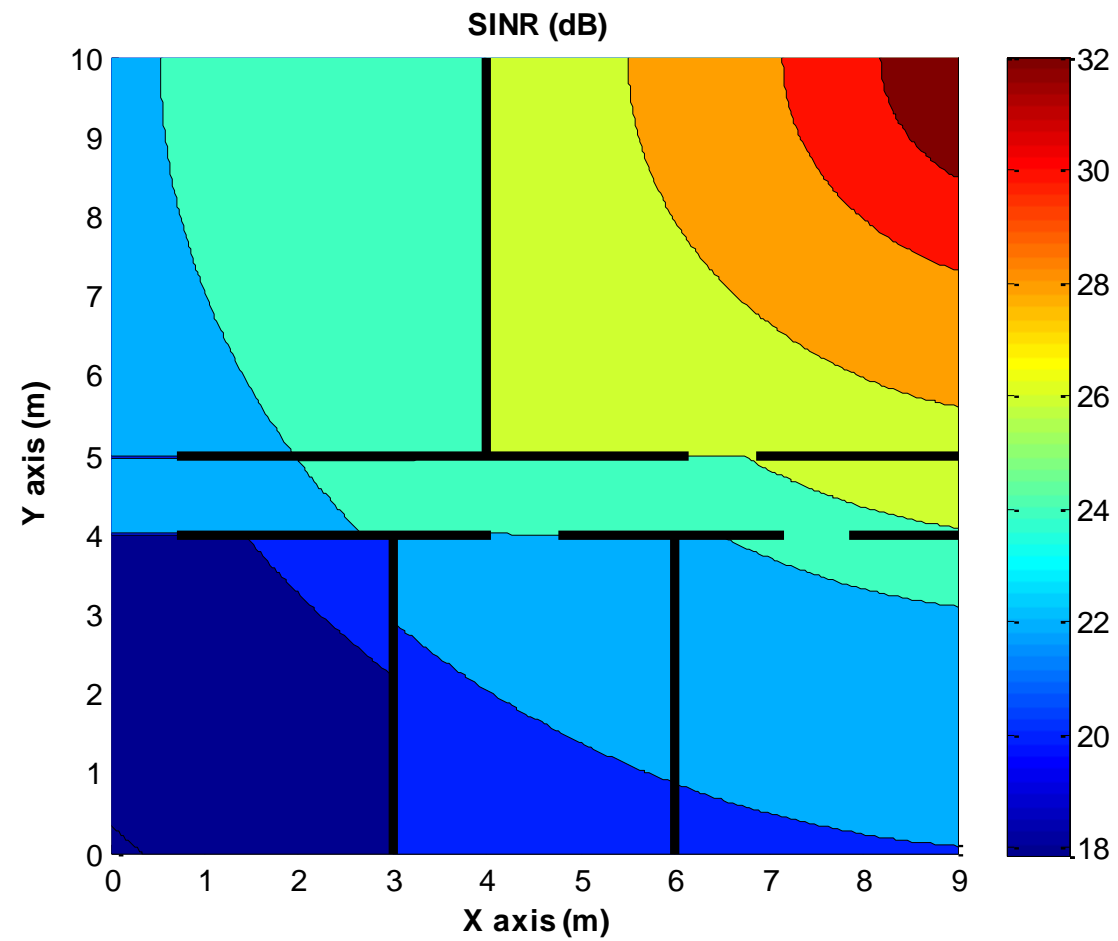


Figura 16: SINR, escenario A.1

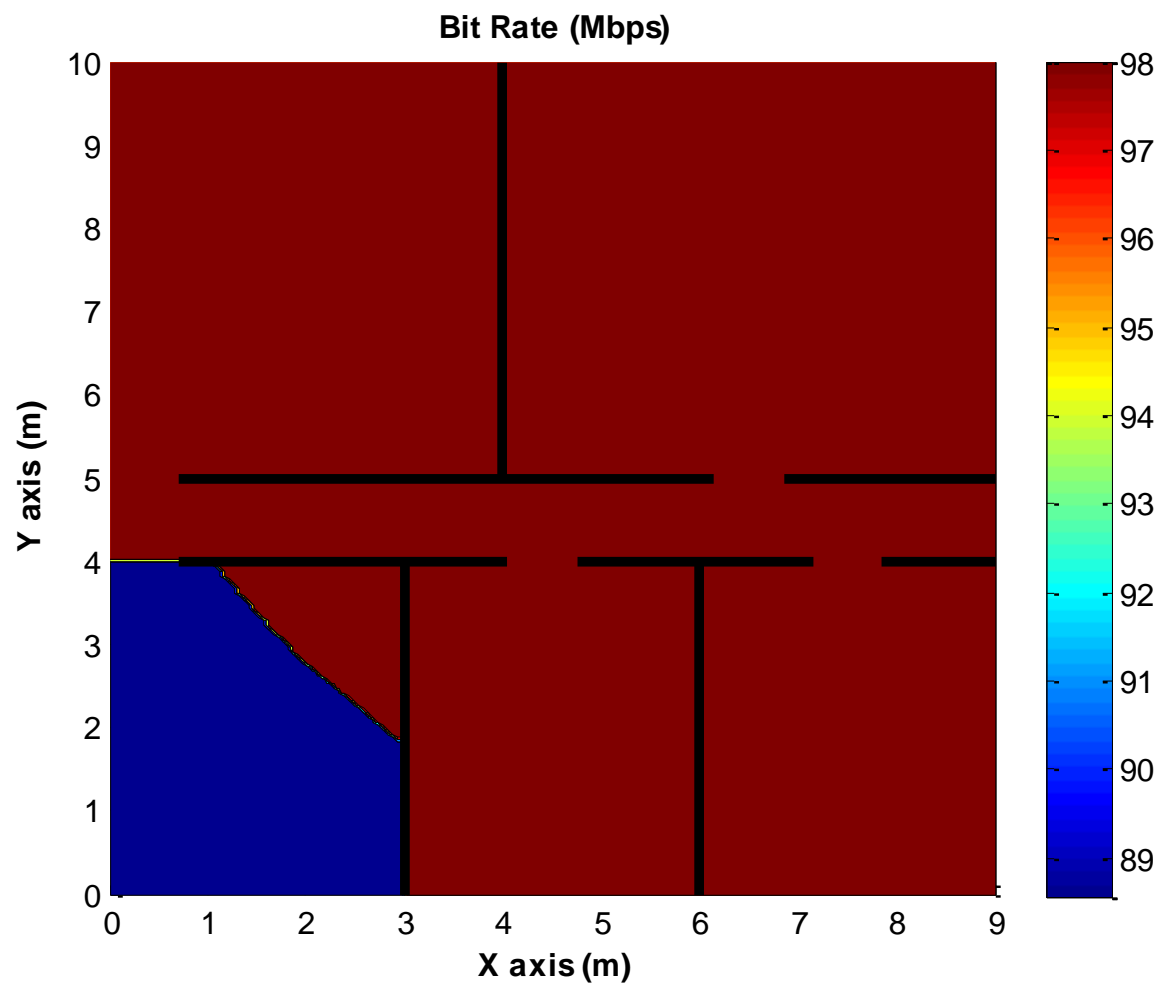


Figura 17: Bit Rate, escenario A.1

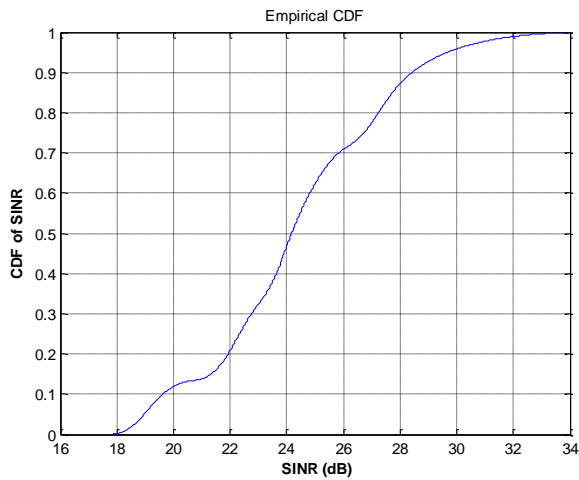


Figura 18: CDF SINR, escenario A.1

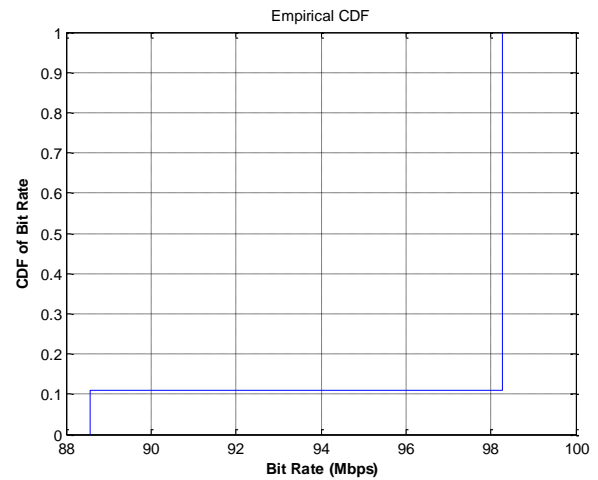


Figura 19: CDF Bit Rate, escenario A.1

En la figura 16 se puede observar con claridad que la zona con más nivel de SINR es la que está situada más cerca de la femtocelda, en la esquina superior derecha del comedor. A medida que la señal emitida se aleja de la antena emisora y atraviesa paredes, podemos apreciar como el nivel de SINR disminuye, hasta llegar a su mínimo en la esquina inferior izquierda de la habitación de invitados.

En la figura 17, la cual muestra la tasa binaria obtenida en el piso, obtenemos que la única habitación en la que no se consigue la tasa binaria máxima de 98.28 Mbps es en la habitación de invitados, hecho que se explica con la disminución de SINR mencionada en el anterior párrafo.

A partir de las gráficas de que muestran las funciones de distribución acumulada tanto del SINR como de la tasa binaria (figuras 18 y 19), se puede concluir que en la mayor parte del piso el nivel de SINR es mayor a los 24 dB y que la tasa binaria predominante corresponde a los 98.28 Mbps mencionados anteriormente.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	33.9215 dB	18.8754 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

## 5.2.2 Planta del medio

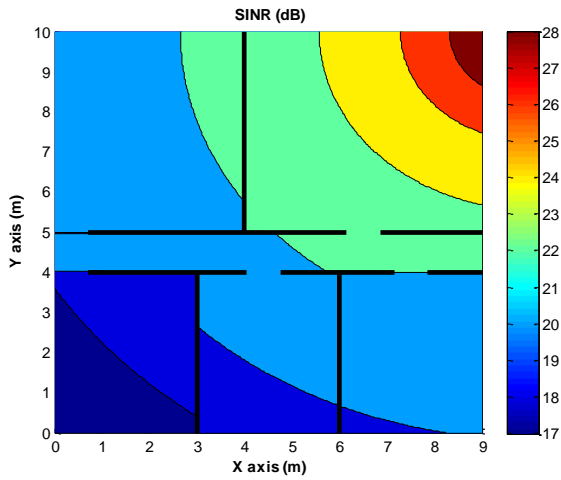


Figura 20: SINR, escenario A.2

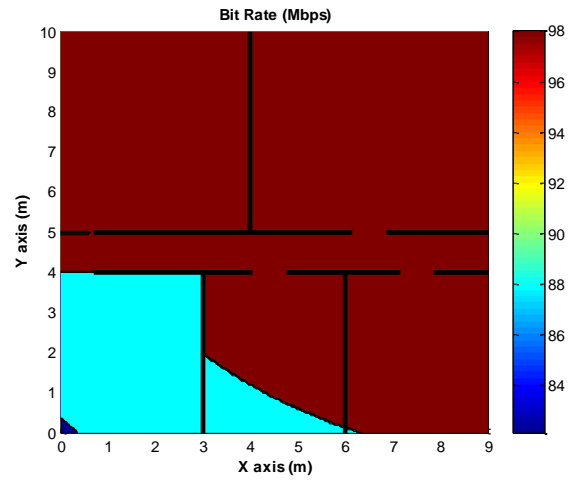


Figura 21: Bit Rate, escenario A.2

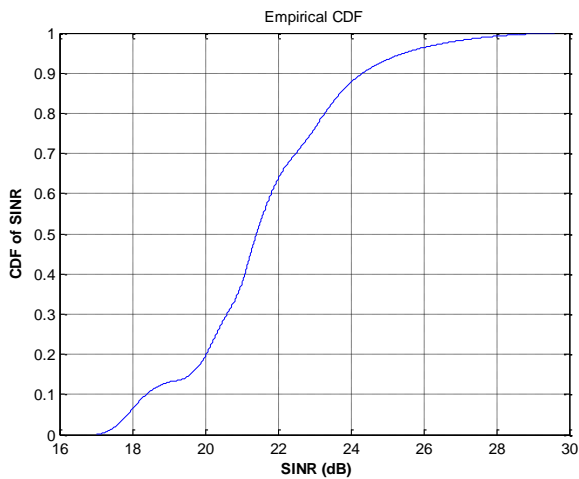


Figura 22: CDF SINR, escenario A.2

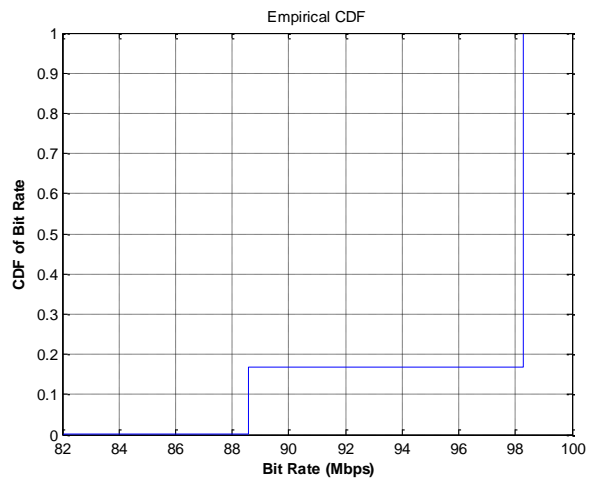


Figura 23: CDF Bit Rate, escenario A.2

En este escenario podemos observar como el nivel de SINR baja con respecto al piso superior, debido a la mayor cercanía de las femtoceldas interferentes. Debido a esto, la tasa binaria disminuye en el aseo y en menor parte en la cocina, y en la habitación de invitados ya no existe ningún punto en el que se alcance el máximo.

	MÁXIMO	MÍNIMO
SINR	29.5945 dB	16.9937 dB
TASA BINARIA	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

### 5.2.3 Planta inferior

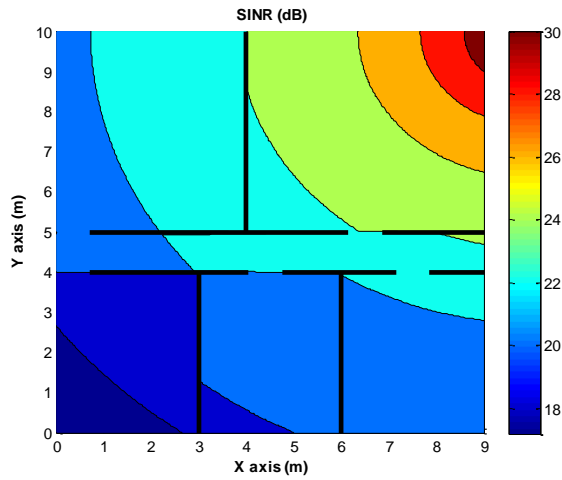


Figura 24: SINR, escenario A.3

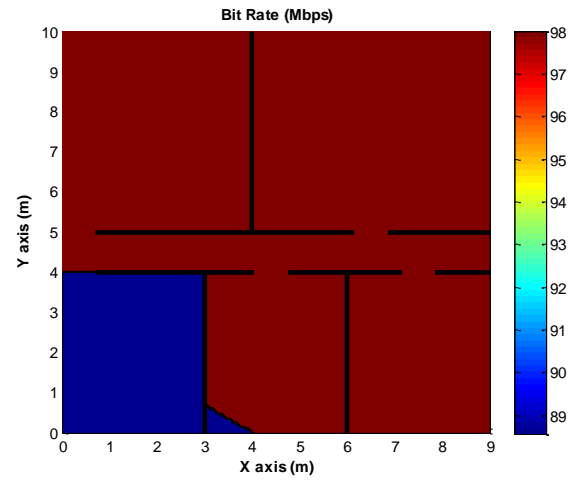


Figura 25: Bit Rate, escenario A.3

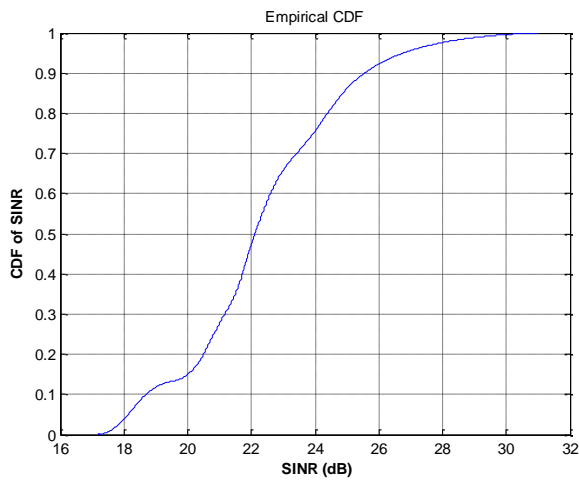


Figura 26: CDF SINR, escenario A.3

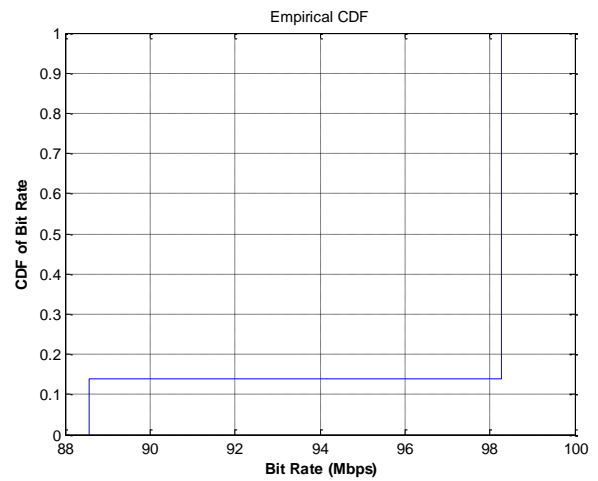


Figura 27: CDF Bit Rate, escenario A.3

En la tercera planta mejora tanto el nivel de SINR como de tasa binaria respecto a la planta de en medio, pero no se alcanzan los valores de la planta superior aunque la distancia con las femtoceldas interferentes sea la misma. Esto es debido a que sus antenas radian hacia abajo con una ganancia de 3 dB, mientras que hacia arriba lo hacen con 0 dB.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	30.9944 dB	17.1815 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

## 5.3 Tres edificios, edificio central

### 5.3.1 Planta superior

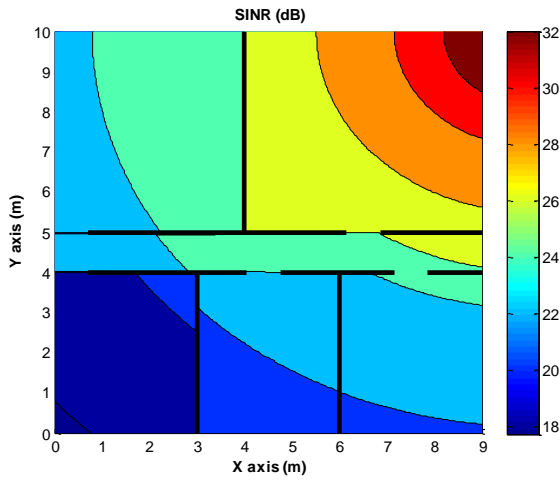


Figura 28: SINR, escenario B.1

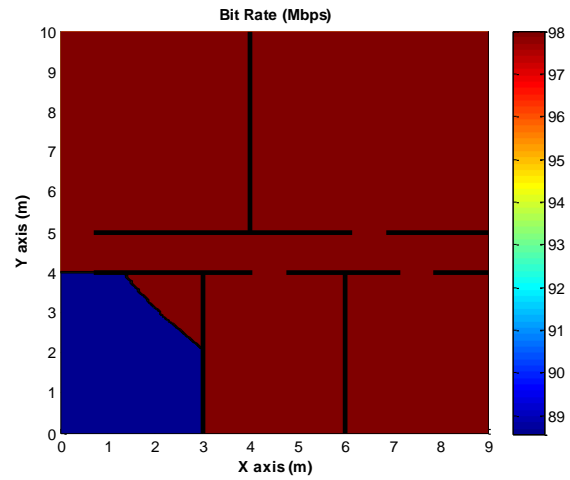


Figura 29: Bit Rate, escenario B.1

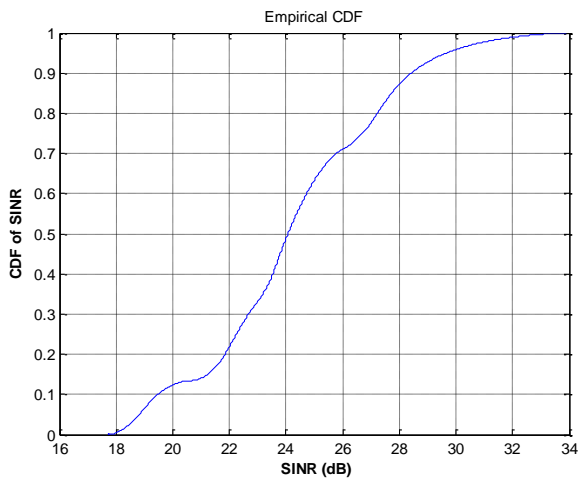


Figura 30: CDF SINR, escenario B.1

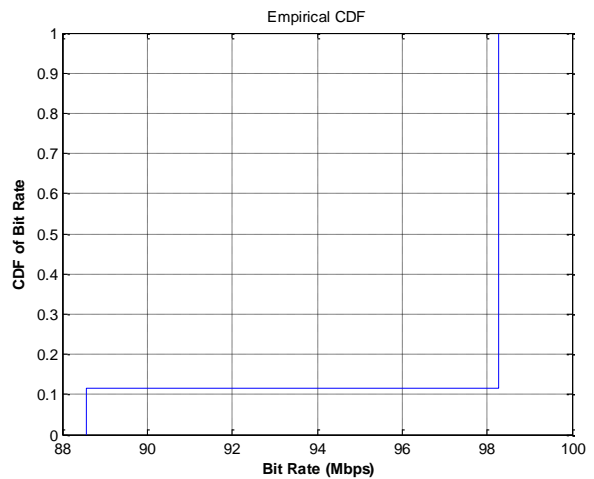


Figura 31: CDF Bit Rate, escenario B.1

En este escenario podemos observar como la calidad de señal empeora respecto al anterior caso de la planta superior en el cual solo había un edificio, pero dicha disminución es mínima debido a que las femtoceldas emiten a baja potencia y las señales provenientes de los edificios colindantes sufren muchas pérdidas.

	MÁXIMO	MÍNIMO
SINR	33.9191 dB	17.7959 dB
TASA BINARIA	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps



### 5.3.2 Planta del medio

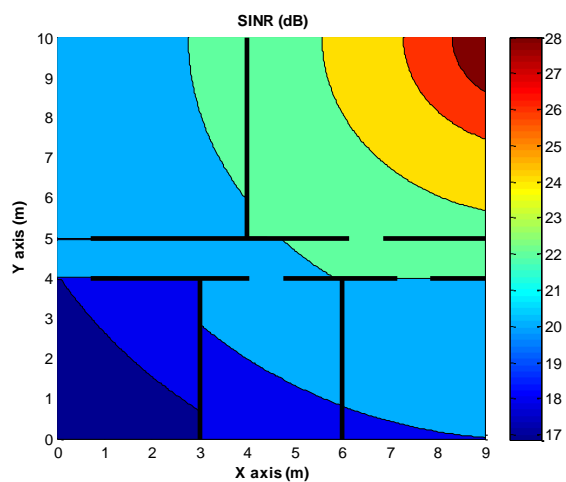


Figura 32: SINR, escenario B.2

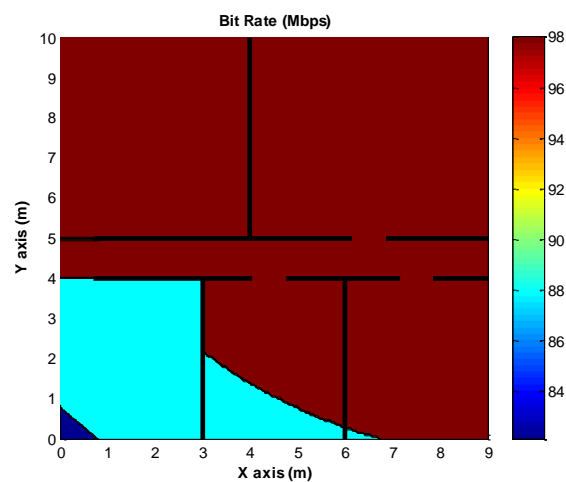


Figura 33: Bit Rate, escenario B.2

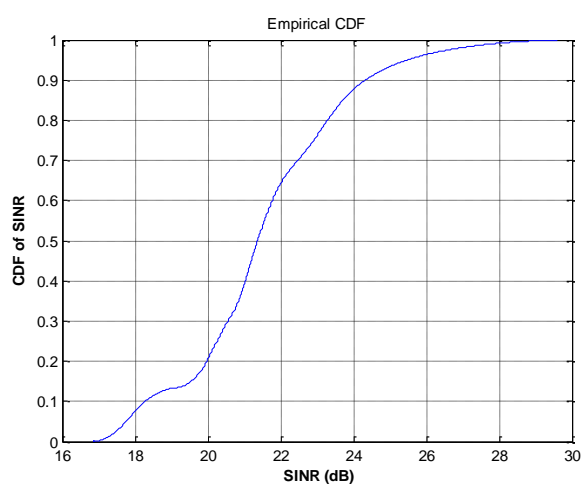


Figura 34: CDF SINR, escenario B.2

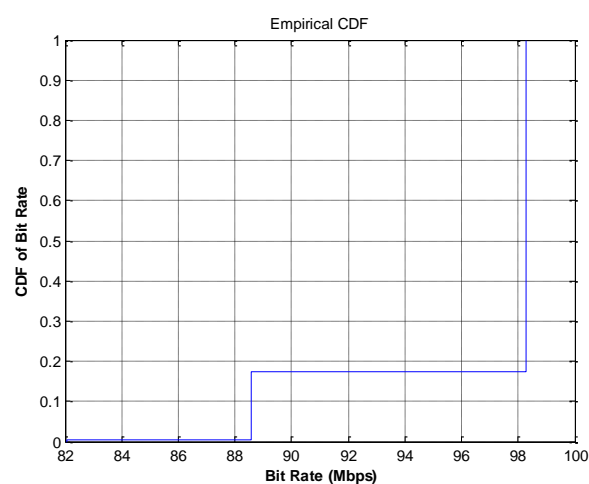


Figura 35: CDF Bit Rate, escenario B.2

Al igual que sucedía en el escenario con un solo edificio, la planta del medio es la que sufre más interferencias de las tres. El efecto de las femtoceldas interferentes de los edificios laterales se nota únicamente en los niveles de SINR, ya que la tasa binaria es prácticamente similar a su caso homónimo en un único edificio.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	29.5937 dB	16.9285 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

### 5.3.3 Planta inferior

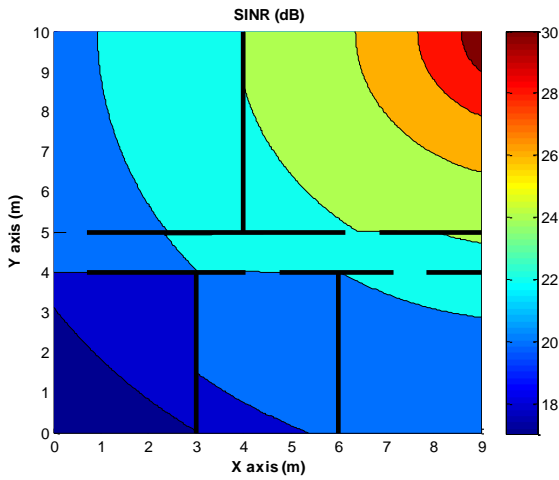


Figura 36: SINR, escenario B.3

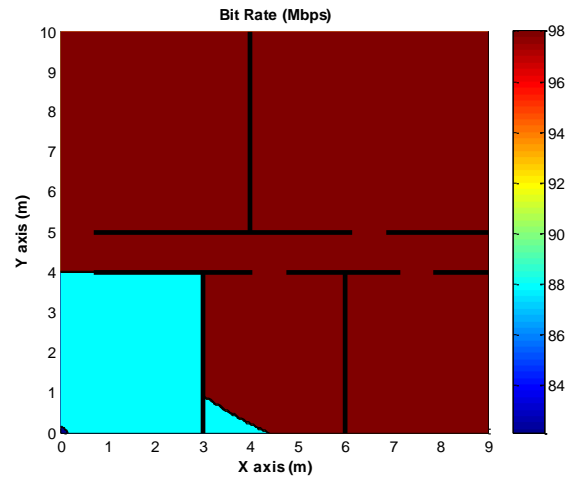


Figura 37: Bit Rate, escenario B.3

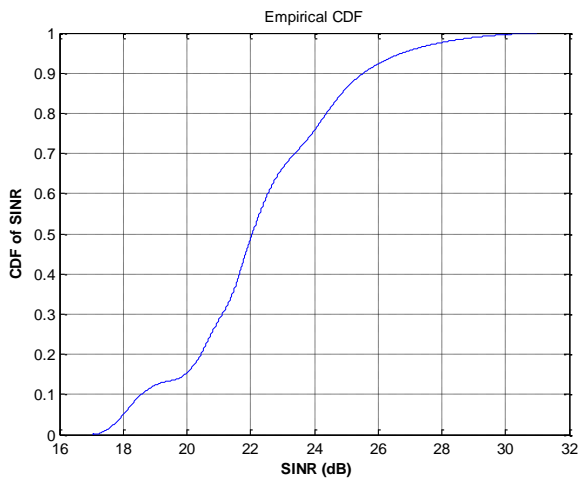


Figura 38: CDF SINR, escenario B.3

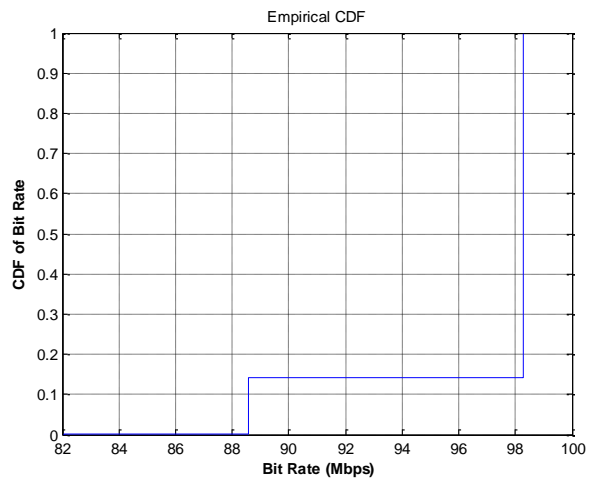


Figura 39: CDF Bit Rate, escenario B.3

En este caso, los niveles de calidad de señal mejoran con respecto a la planta del medio, pero no llegan a ser tan altos como en la planta superior. Al igual que en los dos casos anteriores, el nivel de señal interferente es mínimo y sólo se aprecia a la hora de medir el SINR.

	MÁXIMO	MÍNIMO
SINR	30.9932 dB	17.1135 dB
TASA BINARIA	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

## 5.4 Tres edificios, edificio lateral

### 5.4.1 Planta superior

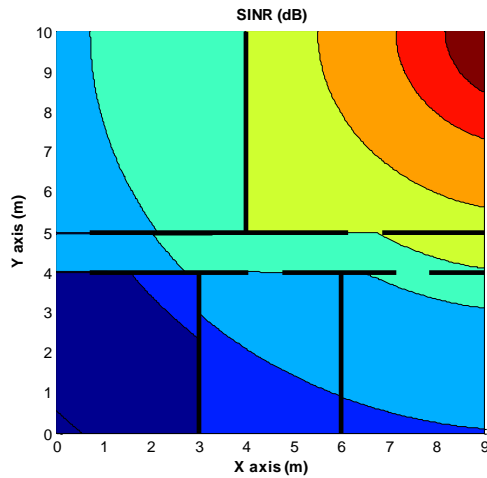


Figura 40: SINR, escenario C.1

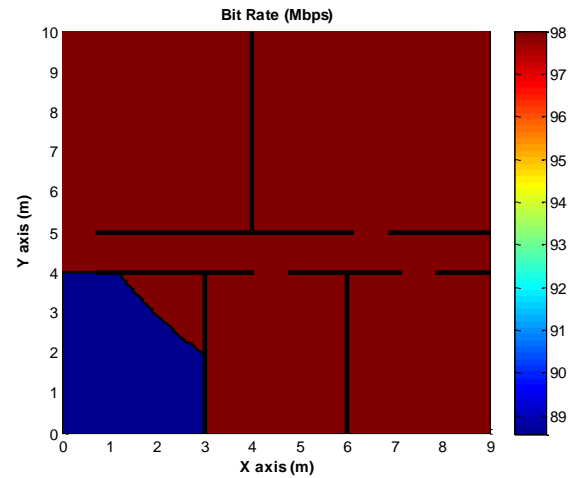


Figura 41: Bit Rate, escenario C.1

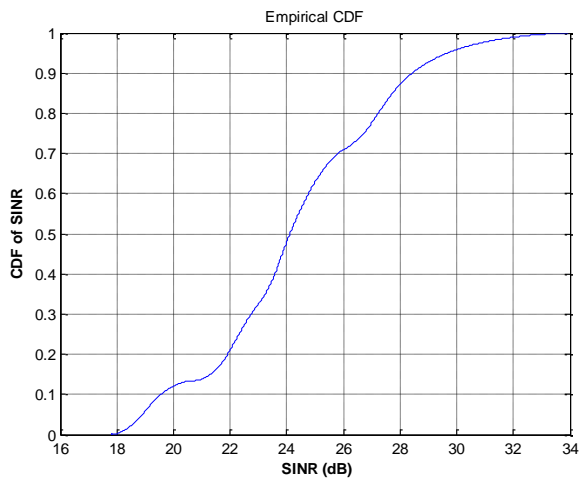


Figura 42: CDF SINR, escenario C.1

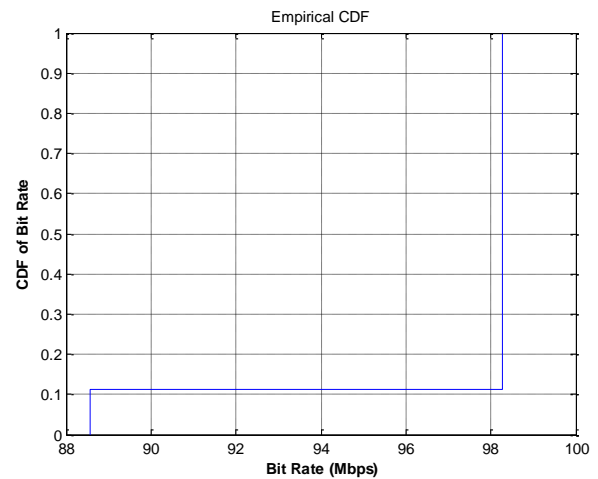


Figura 43: CDF Bit Rate, escenario C.1

Para el caso del edificio lateral de los tres edificios, observamos como el nivel de SINR mejora con respecto al nivel obtenido para el edificio central. Este hecho viene causado por la mayor lejanía de las fuentes interferentes, ya que se podría decir que prácticamente no se recibe señal del otro edificio lateral.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	33.9197 dB	17.7999 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

## 5.4.2 Planta del medio

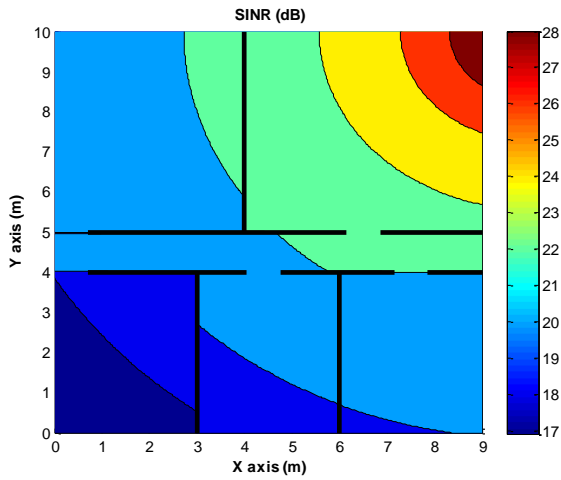


Figura 44: SINR, escenario C.2

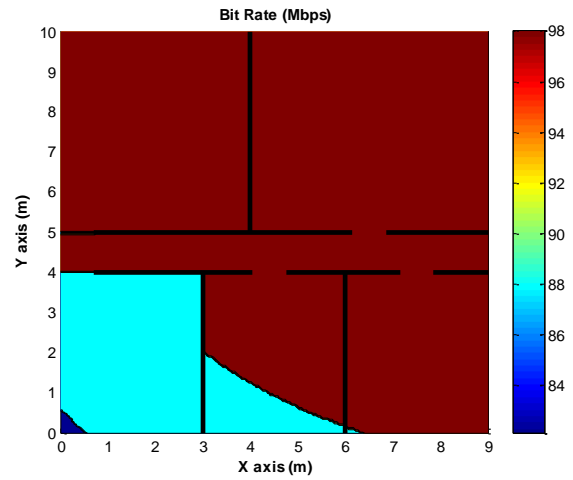


Figura 45: Bit Rate, escenario C.2

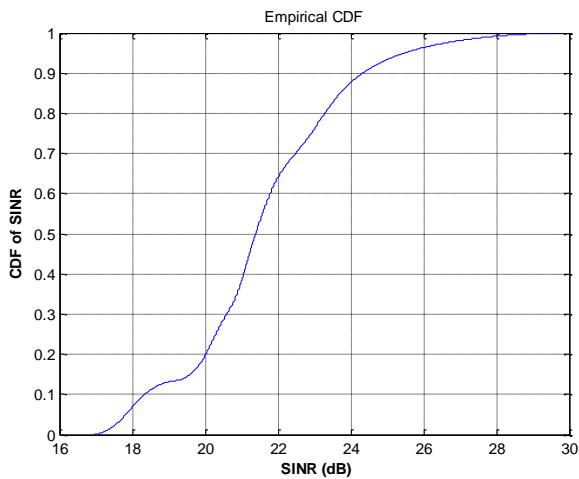


Figura 46: CDF SINR, escenario C.2

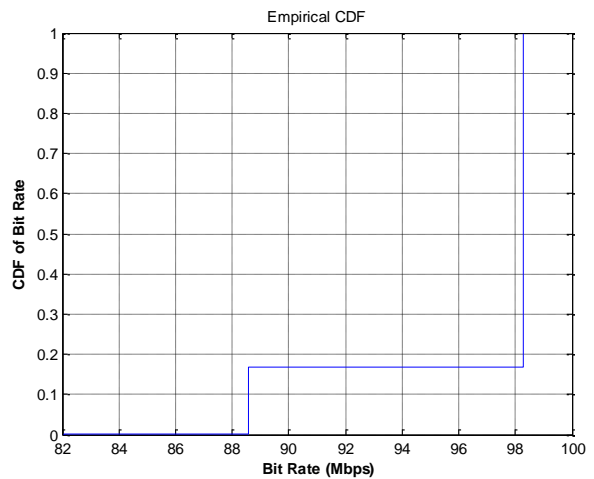


Figura 47: CDF Bit Rate, escenario C.2

Al igual que para la planta superior, en este escenario la calidad de la señal y la tasa binaria mejoran con respecto al caso del edificio central, siendo los valores obtenidos muy parecidos a los del edificio único. La habitación de invitados es la que sufre más degradación de señal y en la única en la que no se alcanza los 98.28 Mbps.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	29.5939 dB	16.9319 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

### 5.4.3 Planta inferior

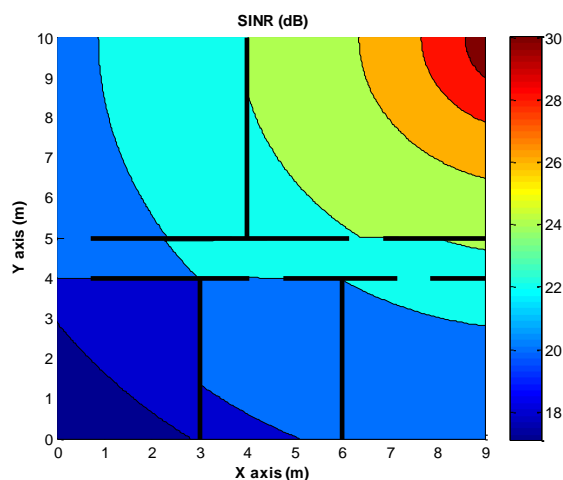


Figura 48: SINR, escenario C.3

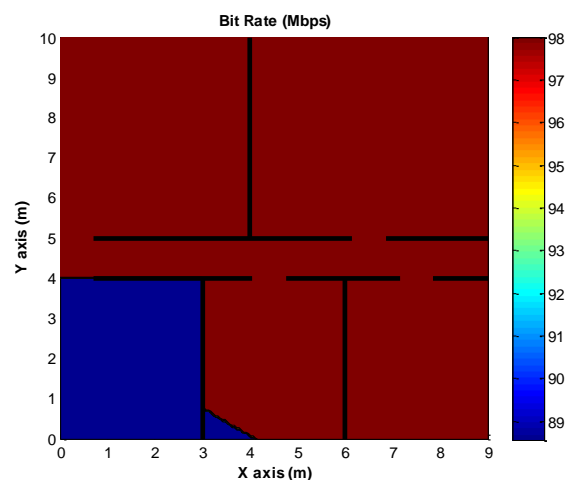


Figura 49: Bit Rate, escenario C.3

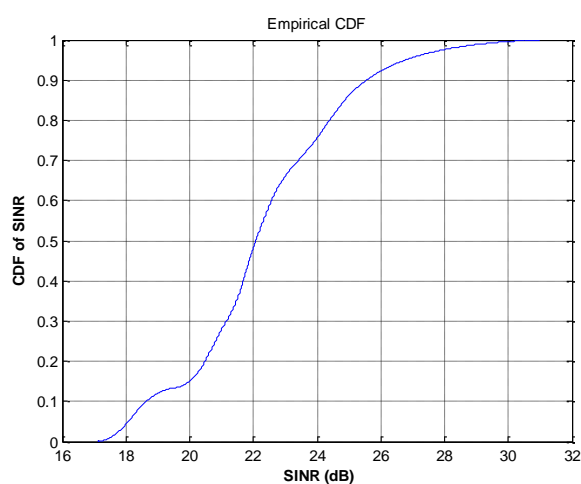


Figura 50: CDF SINR, escenario C.3

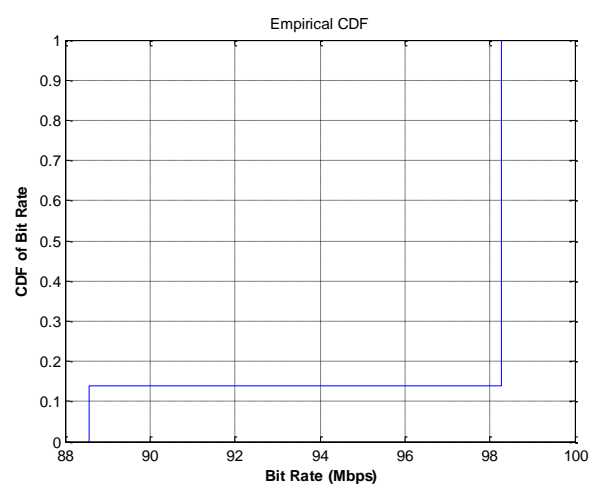


Figura 51: CDF Bit Rate, escenario C.3

En este escenario simulado, se vuelve a observar el efecto que producen las ganancias de 3 dB que tienen las antenas de las femtoceldas cuando radian hacia abajo, ya que los resultados obtenidos son peores que los pertenecientes a la planta superior. Por otro lado, la calidad de la señal y el nivel de tasa binaria son mejores que en la planta inferior del edificio central.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	30.9935 dB	17.1169 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

## 5.5 Tres edificios y macrocelda, edificio central

### 5.5.1 Macrocelda a 10 metros

#### 5.5.1.1 Planta superior

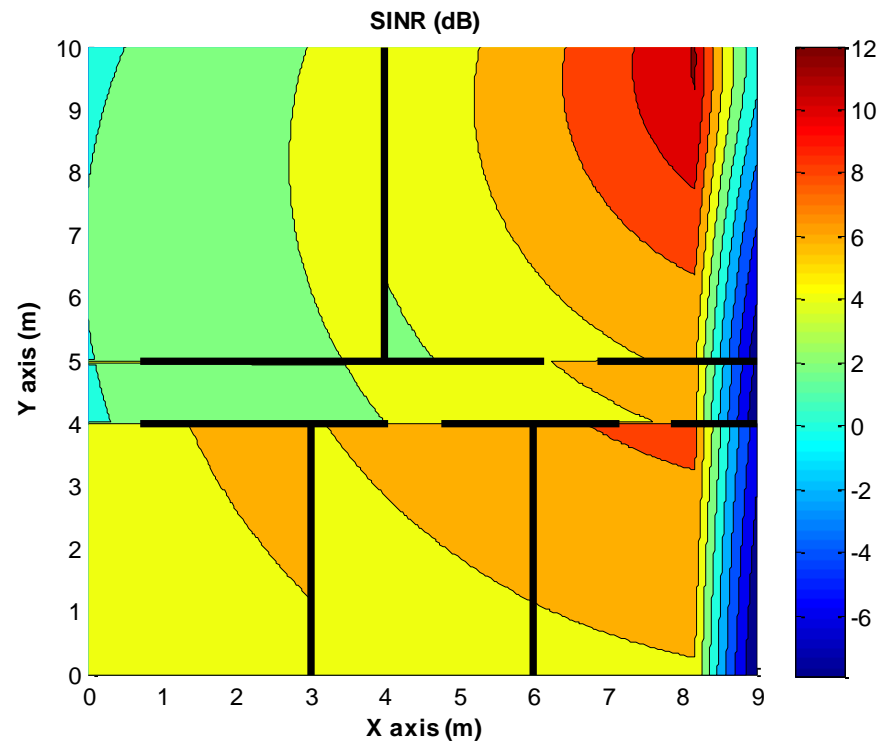


Figura 52: SINR, escenario D.1\_10

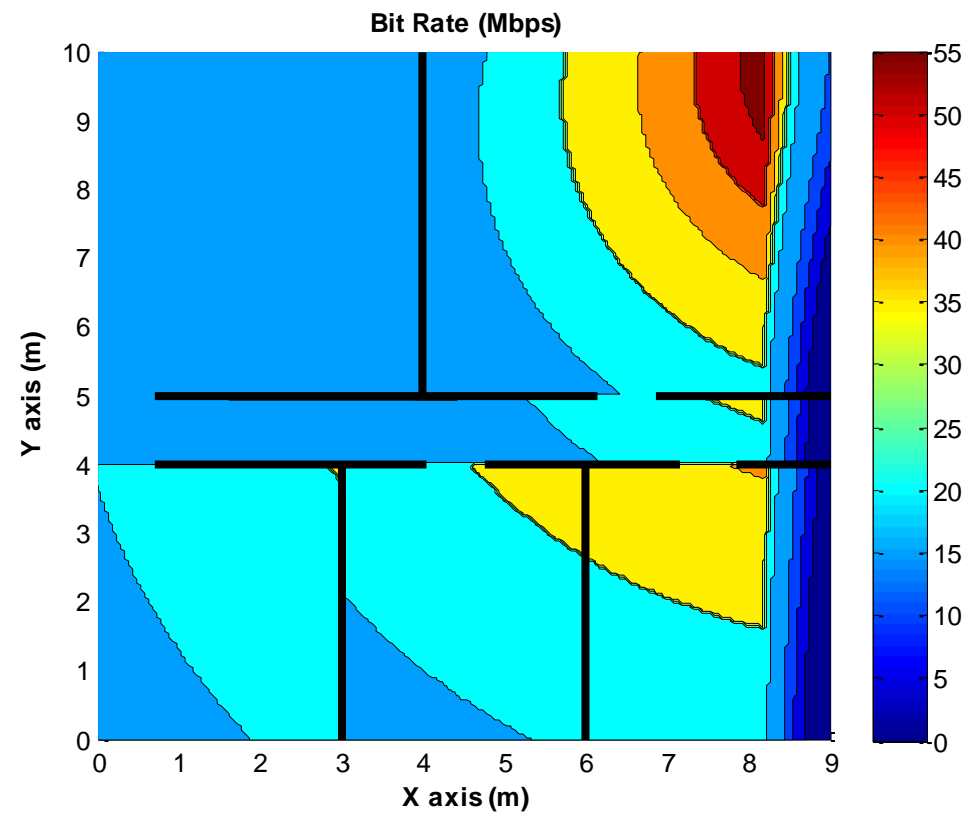


Figura 53: Bit Rate, escenario D.1\_10

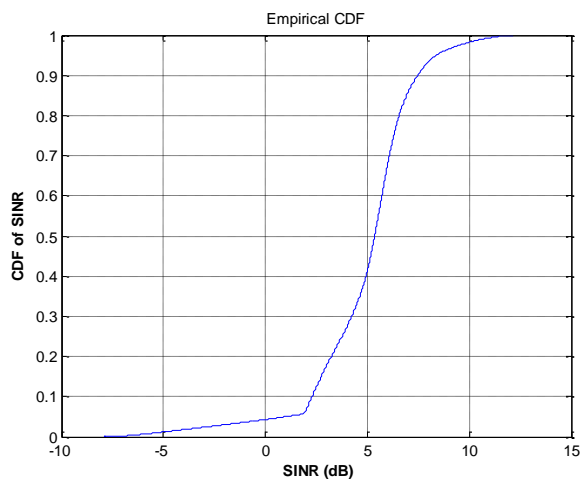


Figura 54: CDF SINR, escenario D.1\_10

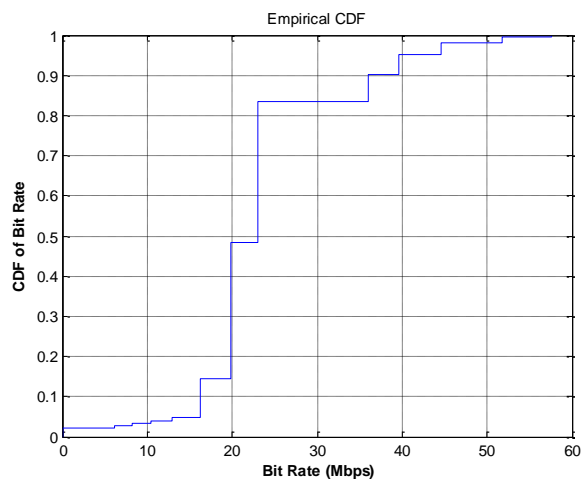


Figura 55: CDF Bit Rate, escenario D.1\_10

En la figura 52 se observa la disminución notable del nivel de SINR debido a la introducción de una macrocelda a 10 metros, llegando a haber valores negativos para esta relación señal-ruido-interferencia, lo que significa que las interferencias recibidas en ciertos puntos del piso superan al nivel de señal emitida por la femtocelda. Cabe destacar que para las simulaciones con macrocelda a 10 metros ha sido necesario aumentar la potencia de la femtocelda a 100 mW para poder obtener niveles de SINR positivos.

Por otro lado, en la gráfica se puede apreciar el efecto de la función de ganancia que presenta la antena transmisora de la macrocelda, de manera que cuanto menor sea el ángulo que forme el punto bajo estudio con la antena de la macrocelda mayor será la ganancia de esta y, por tanto, mayor el nivel de señal interferente. Este efecto se observa en el nivel de SINR de la parte adyacente a la pared de la derecha del piso, ya que es mucho menor que en el resto de puntos. El hecho de que haya valores de SINR por debajo de los -3.4 dB provoca que haya tasas binarias de 0 Mbps, ya que con esa calidad de señal no es posible transmitir datos.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	12.1655 dB	-7.9000 dB
<b>TASA BINARIA</b>	57.6000 Mbps	00.0000 Mbps



### 5.5.1.2 Planta del medio

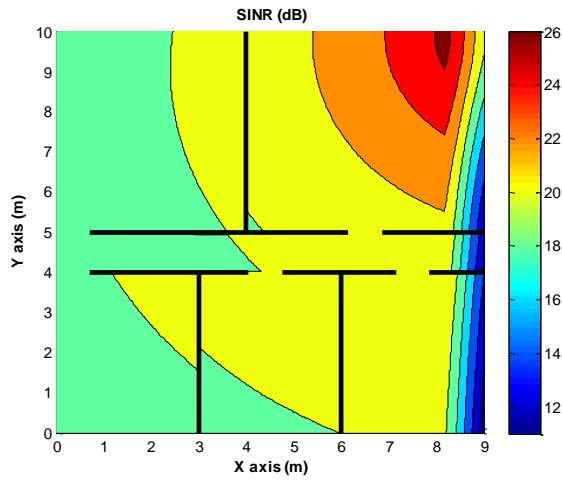


Figura 56: SINR, escenario D.2\_10

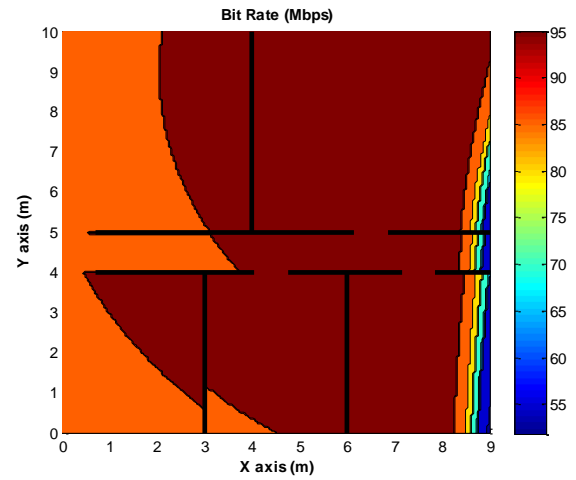


Figura 57: Bit Rate, escenario D.2\_10

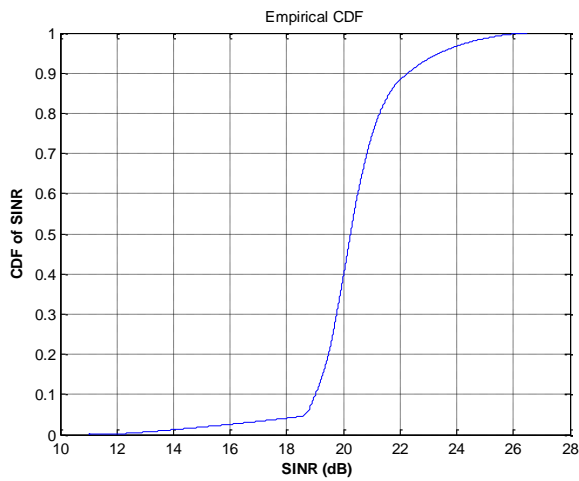


Figura 58: CDF SINR, escenario D.2\_10

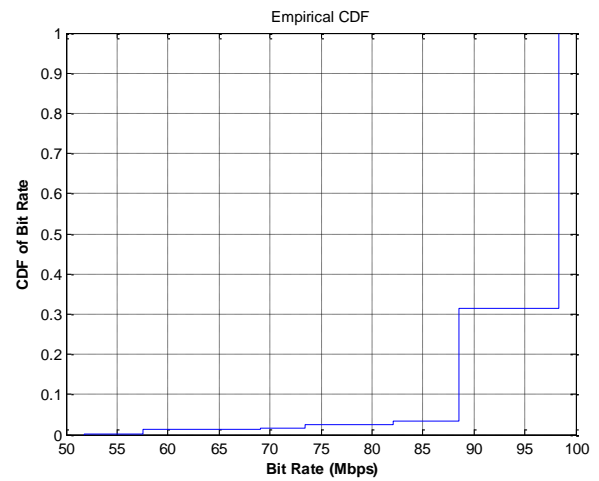


Figura 59: CDF Bit Rate, escenario D.2\_10

Para el caso de la planta del medio el nivel de SINR mejora bastante con respecto a la planta superior, ya que la señal de la macrocelda sufre más desvanecimientos y pérdidas, ya que la distancia es mayor y la señal atraviesa un suelo. Aun así, la calidad de señal y la tasa binaria son inferiores al caso sin macrocelda.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	26.4844 dB	11.0031 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	51.8400 Mbps

### 5.5.1.3 Planta inferior

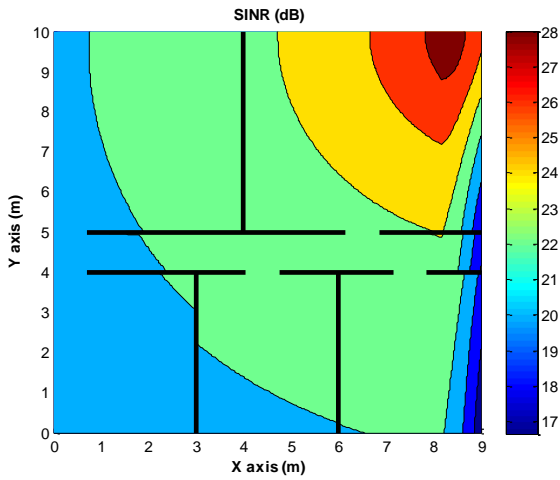


Figura 60: SINR, escenario D.3\_10

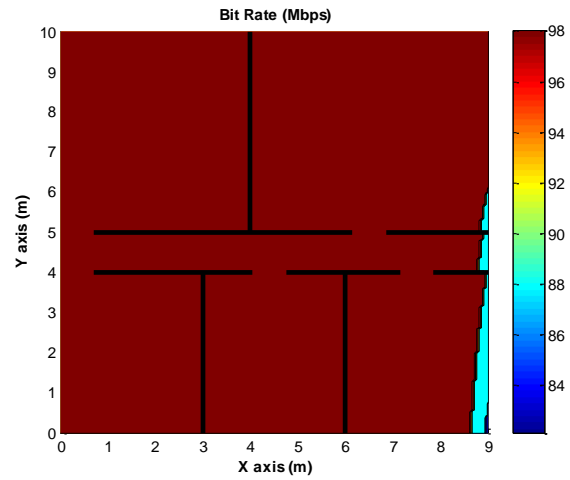


Figura 61: Bit Rate, escenario D.3\_10

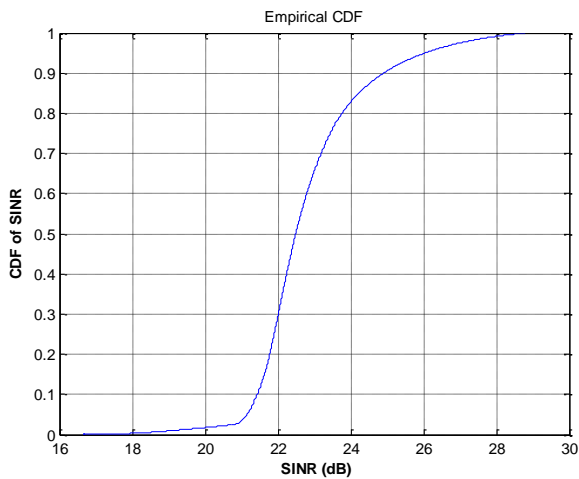


Figura 62: CDF SINR, escenario D.3\_10

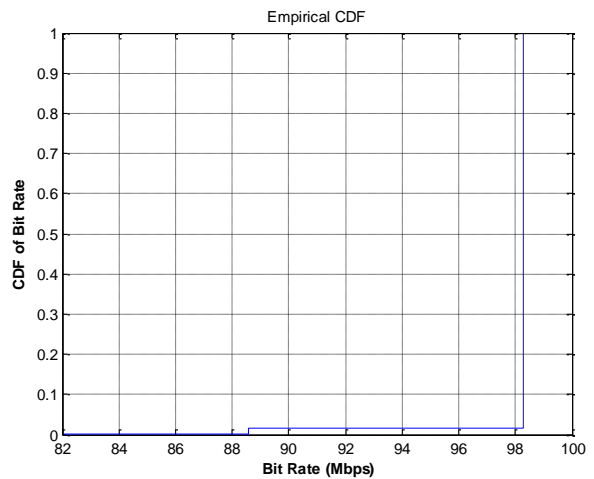


Figura 63: CDF Bit Rate, escenario D.3\_10

En este escenario se acentúa más el desvanecimiento de la señal de la macrocelda, por lo que el nivel de SINR aumenta, aunque no llega a alcanzar el nivel que se obtiene sin macrocelda. La tasa binaria puede parecer mejor que la obtenida para el caso sin macrocelda, pero hay que recordar que en esta simulación la potencia de la femtocelda es mayor, por lo que la comparación no es viable.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	28.7894 dB	16.6589 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

## 5.5.2 Macrocelda a 50 metros

### 5.5.2.1 Planta superior

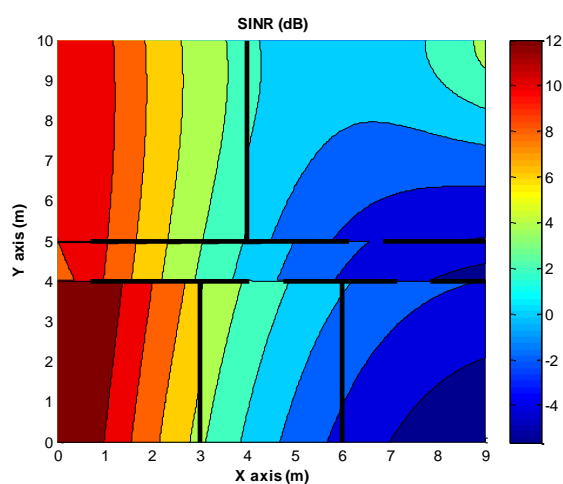


Figura 64: SINR, escenario D.1\_50

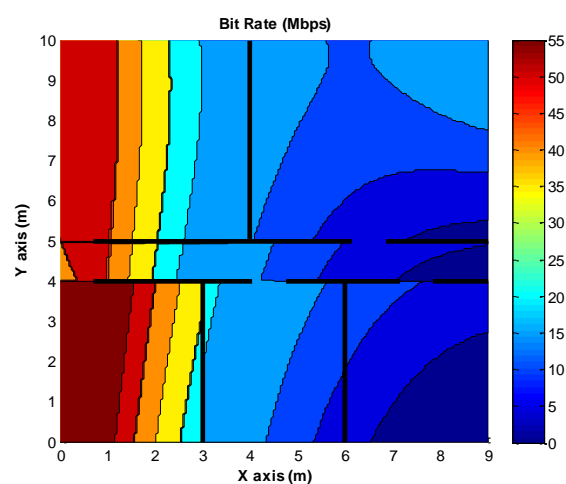


Figura 65: Bit Rate, escenario D.1\_50

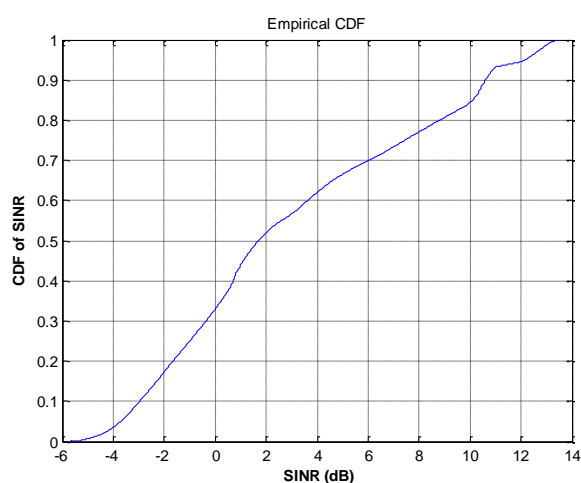


Figura 66: CDF SINR, escenario D.1\_50

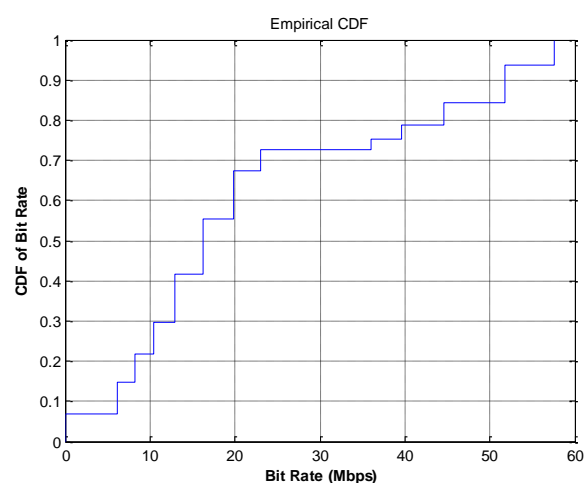


Figura 67: CDF Bit Rate, escenario D.1\_50

Con la macrocelda situada a 50 metros, el nivel de señal aumenta ligeramente con respecto al caso de la macrocelda a 10 metros, aunque sigue siendo bastante inferior al caso sin macrocelda. Debido a los valores negativos de SINR, sigue habiendo tasas binarias de 0 Mbps.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	13.5813 dB	-5.6497 dB
<b>TASA BINARIA</b>	57.6000 Mbps	00.0000 Mbps

### 5.5.2.2 Planta del medio

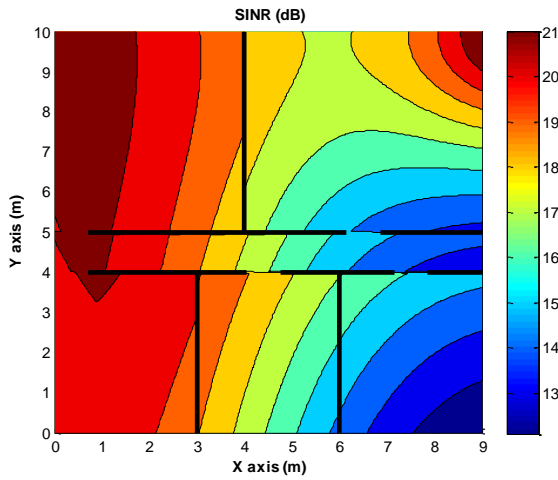


Figura 68: SINR, escenario D.2\_50

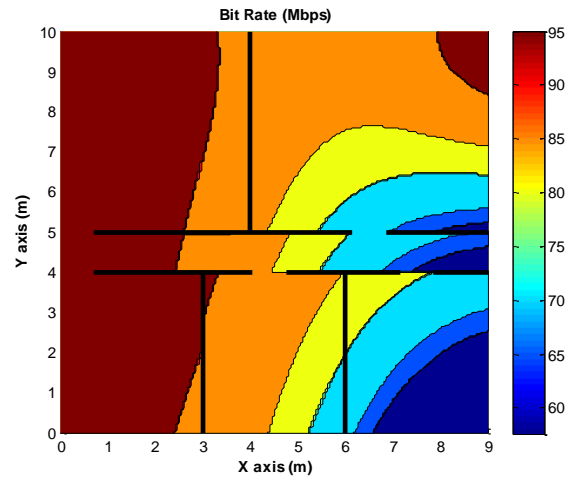


Figura 69: Bit Rate, escenario D.2\_50

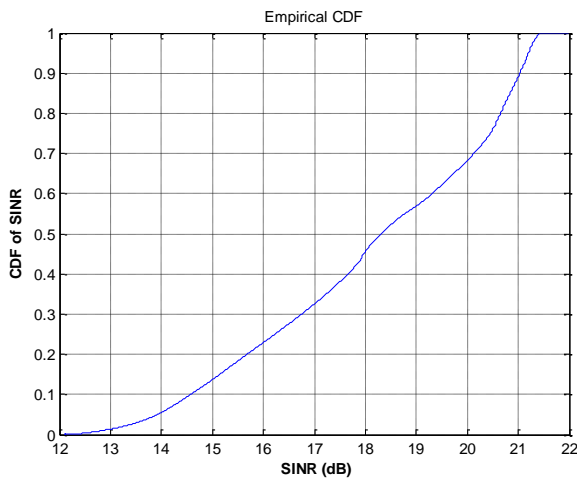


Figura 70: CDF SINR, escenario D.2\_50

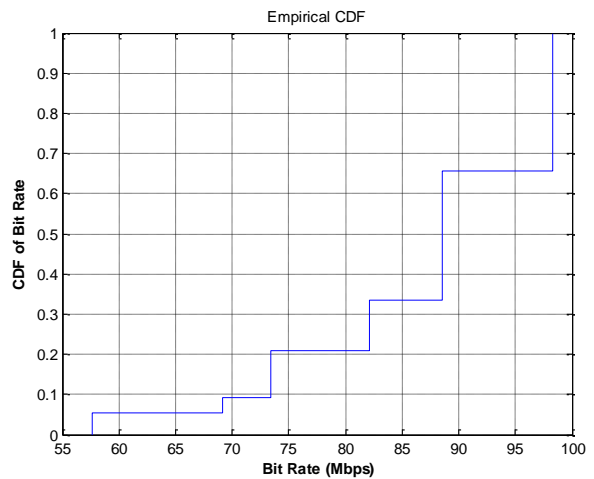


Figura 71: CDF Bit Rate, escenario D.2\_50

En este escenario, aunque la macrocelda este situada a más distancia, los niveles de SINR y por consiguiente, de tasa binaria, son menores que en el caso de la macrocelda a 10 metros. Esto se debe a que, aunque la señal de la macrocelda sufra más pérdidas por distancia, el ángulo con el que incide en el piso es menor, con lo que la ganancia aumenta, incrementándose el nivel de señal interferente.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	21.9962 dB	12.0956 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	57.6000 Mbps

### 5.5.2.3 Planta inferior

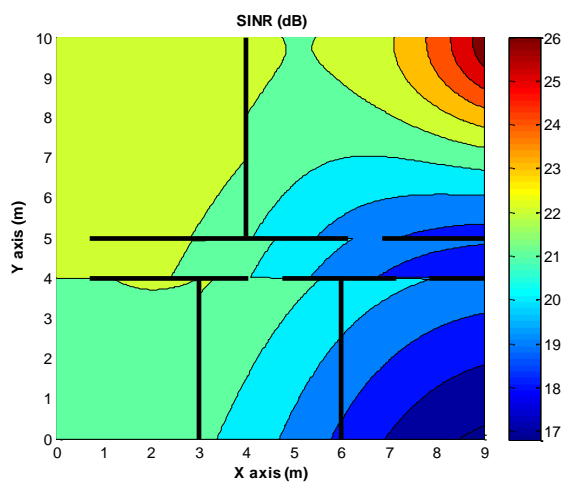


Figura 72: SINR, escenario D.3\_50

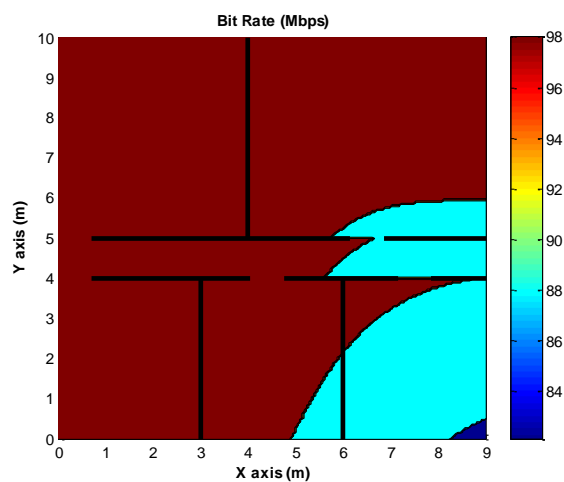


Figura 73: Bit Rate, escenario D.3\_50

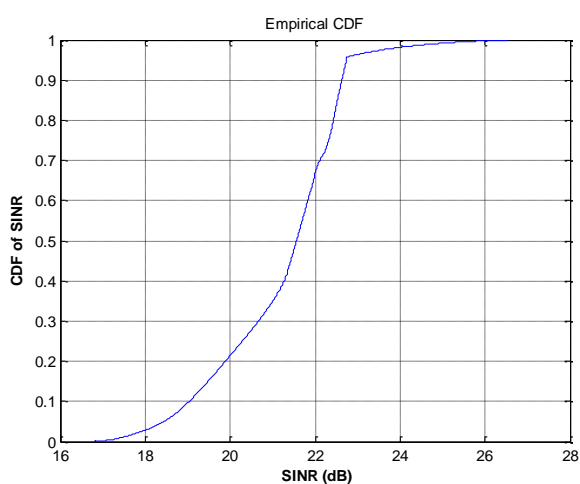


Figura 74: CDF SINR, escenario D.3\_50

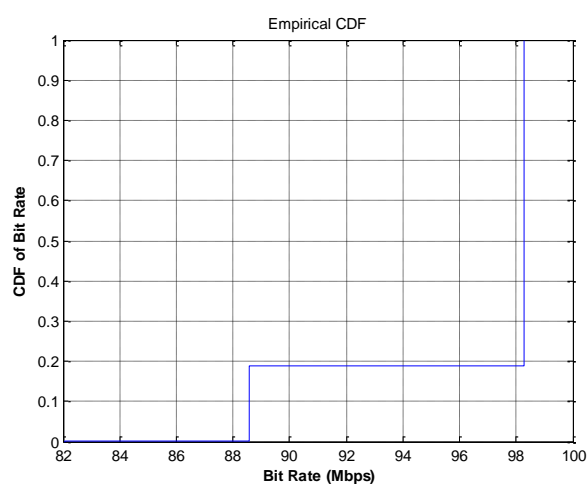


Figura 75: CDF Bit Rate, escenario D.3\_50

Para la planta inferior ocurre lo mismo que para la planta del medio, ya que la antena de la macrocelda reduce su ángulo de radiación con respecto al piso, lo que conlleva a un aumento de ganancia y por lo tanto, a una disminución del nivel de SINR y de tasa binaria con respecto al caso de la macrocelda situada a 10 metros.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	26.5594 dB	16.8075 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

### 5.5.3 Macrocelda a 100 metros

#### 5.5.3.1 Planta superior

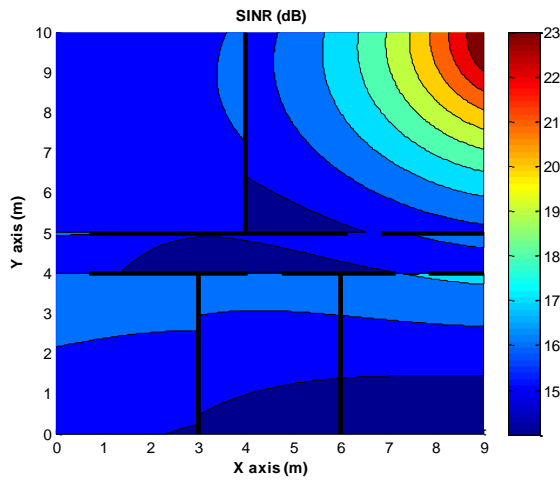


Figura 76: SINR, escenario D.1\_100

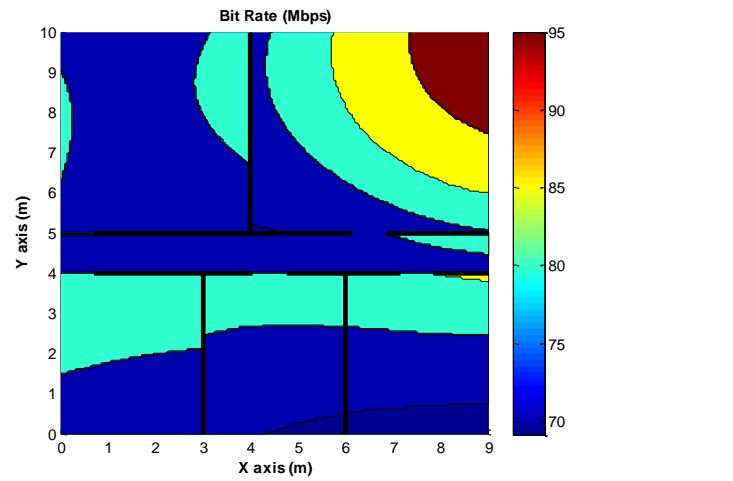


Figura 77: Bit Rate, escenario D.1\_100

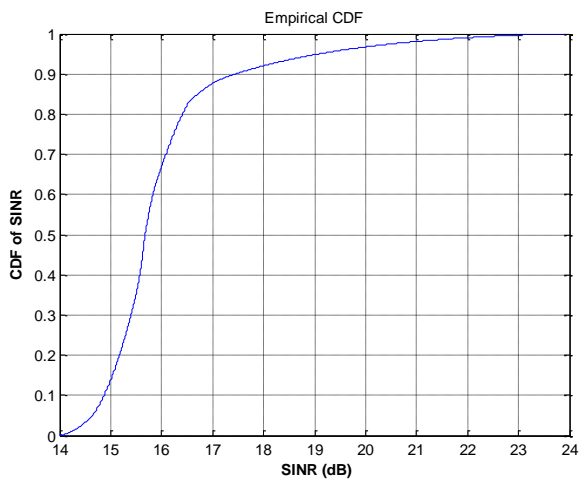


Figura 78: CDF SINR, escenario D.1\_100

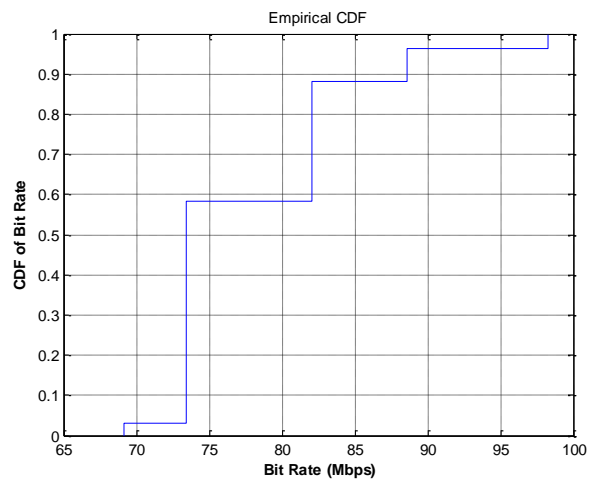


Figura 79: CDF Bit Rate, escenario D.1\_100

Para esta simulación ya se observa que no hay niveles de SINR negativos y que no existen tasa binarias inferiores a 69.12 Mbps, lo que supone un incremento considerable de calidad de servicio con respecto a los casos de macrocelda situada a 10 o 50 metros. Todo esto con una potencia de femtocelda de nuevo de 10 mW.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	23.9092 dB	14.0038 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	69.1200 Mbps

### 5.5.3.2 Planta del medio

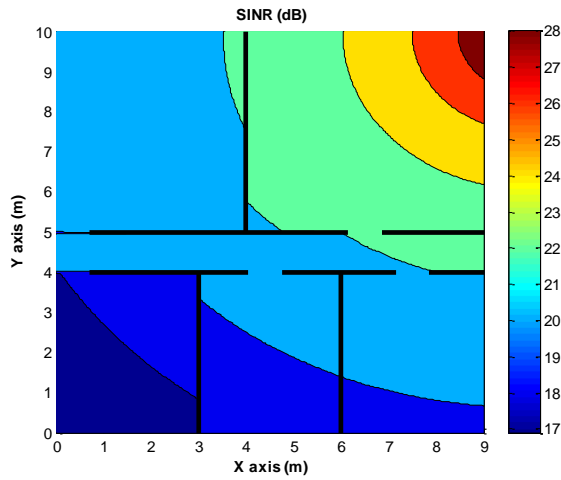


Figura 80: SINR, escenario D.2\_100

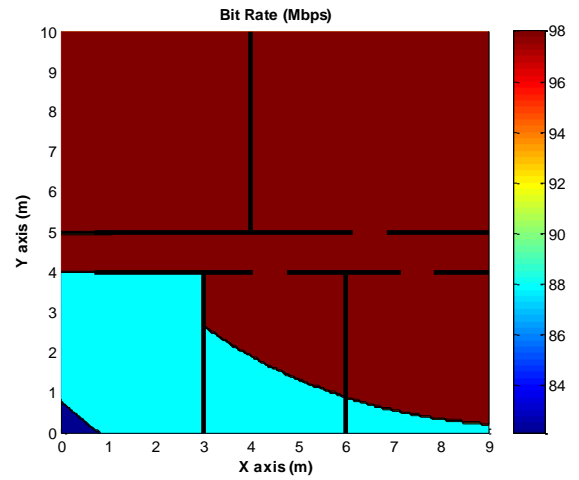


Figura 81: Bit Rate, escenario D.2\_100

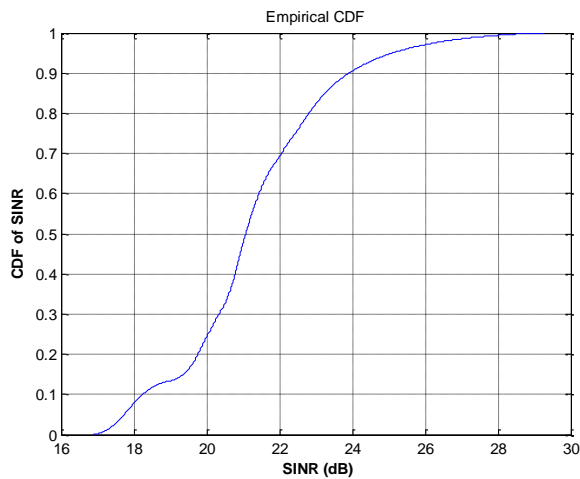


Figura 82: CDF SINR, escenario D.2\_100

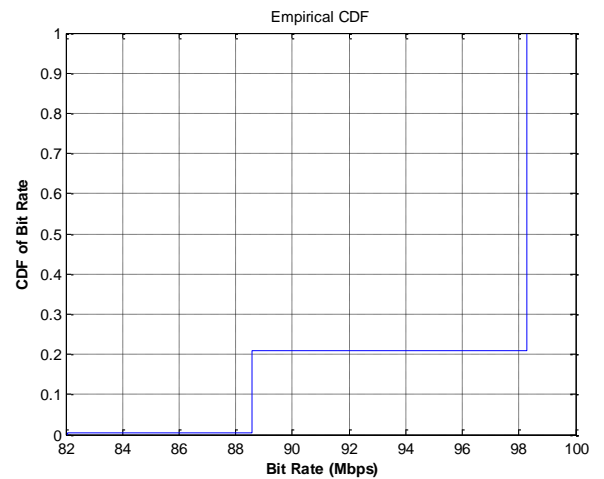


Figura 83: CDF Bit Rate, escenario D.2\_100

En la planta del medio tanto el nivel de SINR como el de tasa binaria empiezan a ser parecidos al caso sin macrocelda interferente, y el efecto de la ganancia se nota mucho menos ya que, aunque el ángulo se pequeño, las pérdidas de propagación compensan este efecto de aumento de ganancia.

	MÁXIMO	MÍNIMO
SINR	29.2796 dB	16.8681 dB
TASA BINARIA	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

### 5.5.3.3 Planta inferior

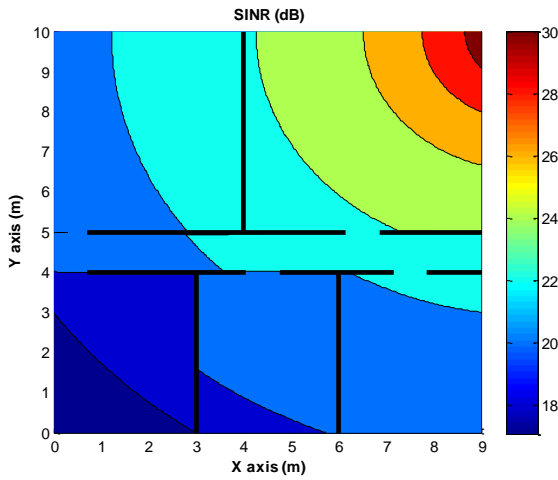


Figura 84: SINR, escenario D.3\_100

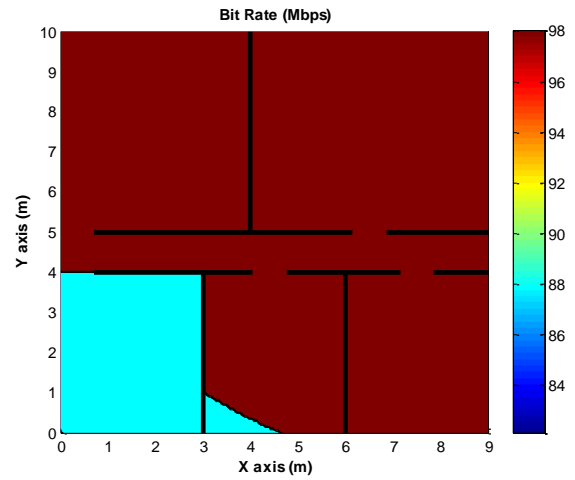


Figura 85: Bit Rate, escenario D.3\_100

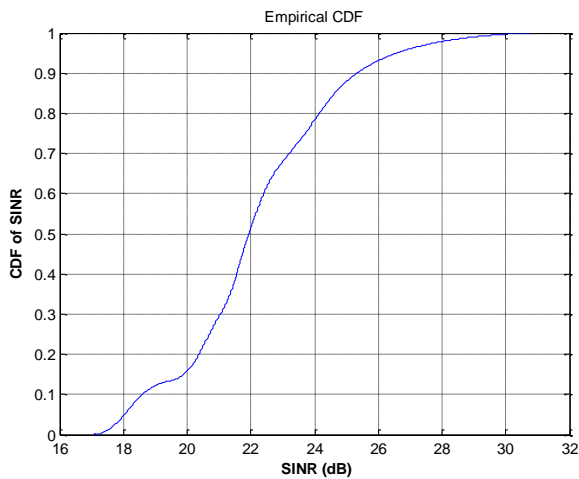


Figura 86: CDF SINR, escenario D.3\_100

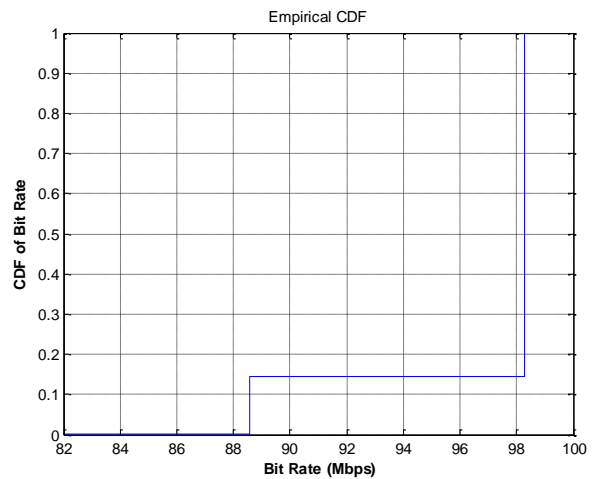


Figura 87: CDF Bit Rate, escenario D.3\_100

En este escenario el nivel de SINR aumenta con respecto a cuándo se contemplaba la macrocelda a 50 metros y las gráficas empiezan a ser parecidas al caso sin macrocelda, lo que provoca que en todo el piso se alcancen valores de tasas binarias más que aceptables, siendo la habitación de invitados la peor zona en cuanto velocidad de transmisión de datos.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	30.8286 dB	17.0895 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps



## 5.5.4 Macrocelda a 250 metros

### 5.5.4.1 Planta superior

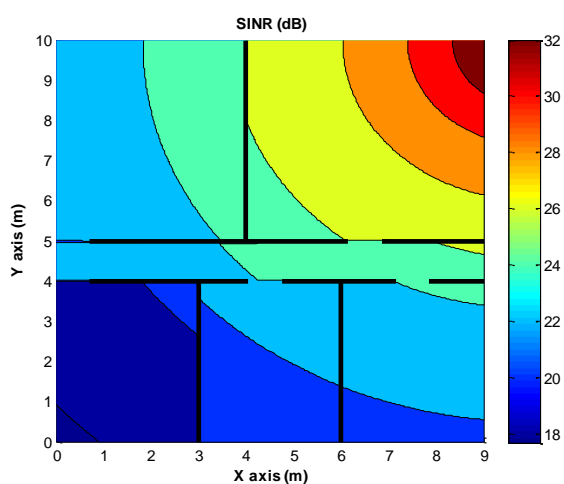


Figura 88: SINR, escenario D.1\_250

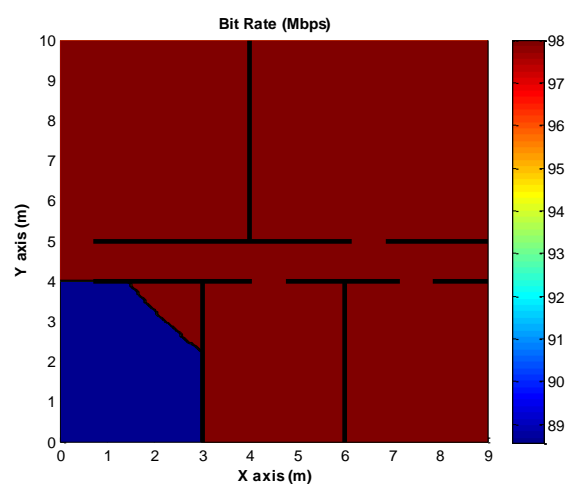


Figura 89: Bit Rate, escenario D.1\_250

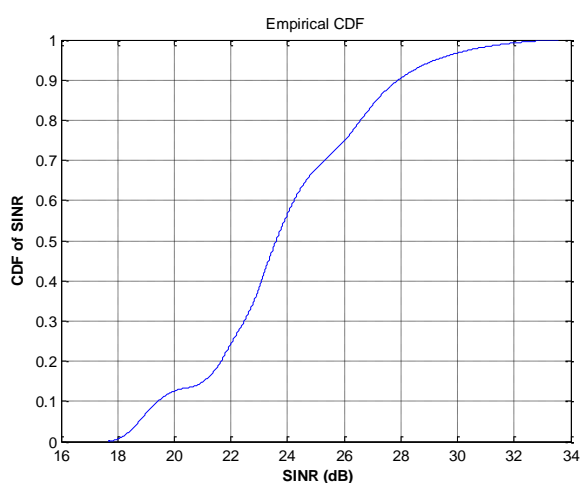


Figura 90: CDF SINR, escenario D.1\_250

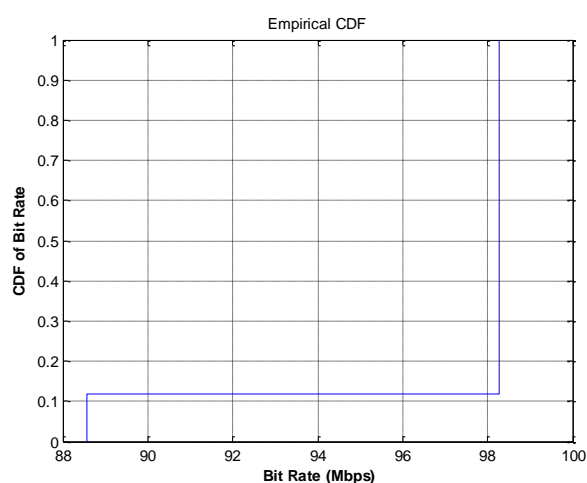


Figura 91: CDF Bit Rate, escenario D.1\_250

Como se observa en las gráficas, los niveles de SINR han aumentado notablemente respecto al caso de la macrocelda a 100 metros, aumentando el máximo hasta en 7 dB y consiguiendo ya la misma tasa binaria que en el caso simulado sin macrocelda.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	33.5725 dB	17.6694 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

### 5.5.4.2 Planta del medio

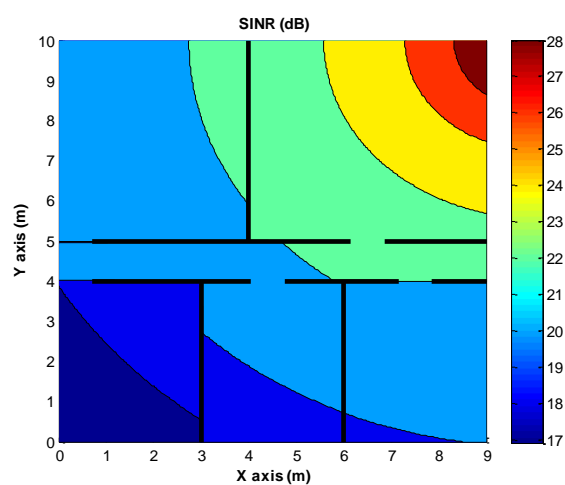


Figura 92: SINR, escenario D.2\_250

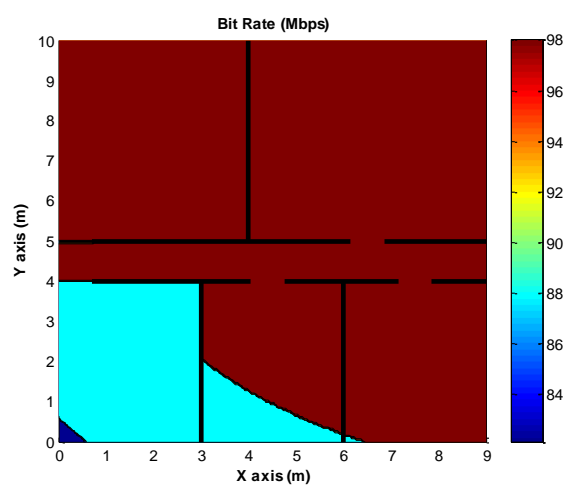


Figura 93: Bit Rate, escenario D.2\_250

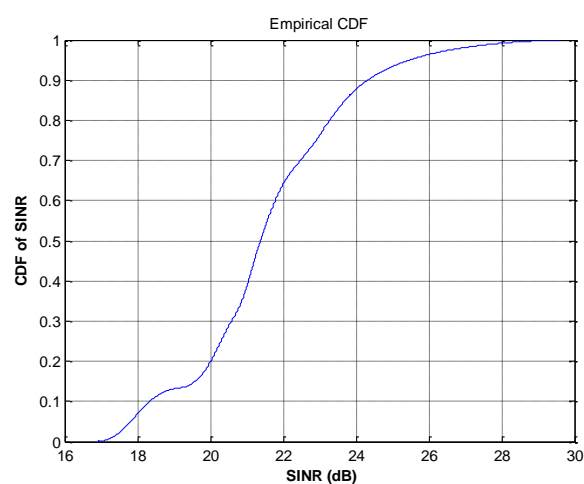


Figura 94: CDF SINR, escenario D.2\_250

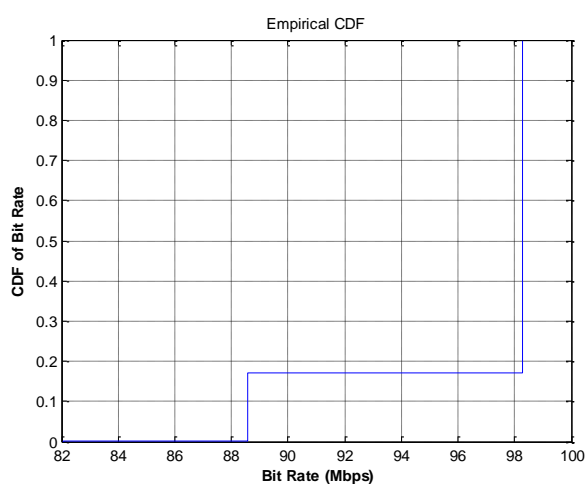


Figura 95: CDF Bit Rate, escenario D.2\_250

En el caso de la planta del medio la subida de nivel de SINR no es tan pronunciada como en el caso de la planta superior, aunque si se puede apreciar. En la tasa binaria ya no existen diferencias de tasa binaria, en cuanto al máximo y al mínimo, con el escenario similar sin macrocelda.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	29.5905 dB	16.9261 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

### 5.5.4.3 Planta inferior

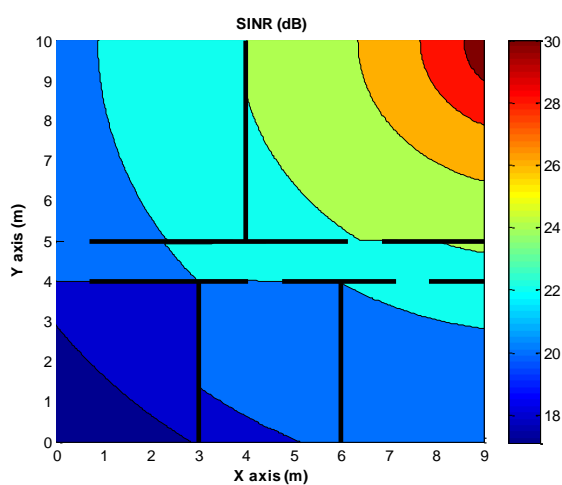


Figura 96: SINR, escenario D.3\_250

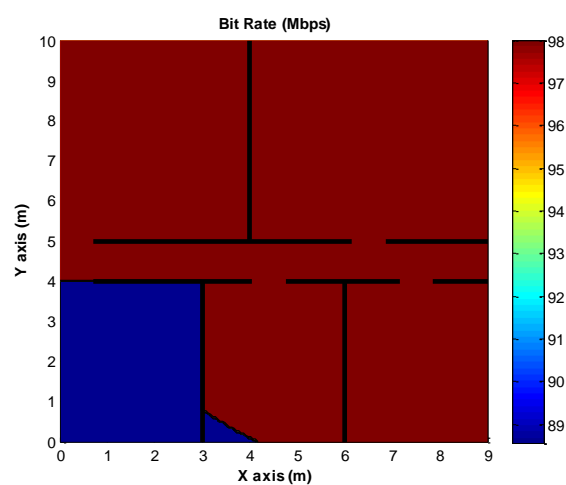


Figura 97: Bit Rate, escenario D.3\_250

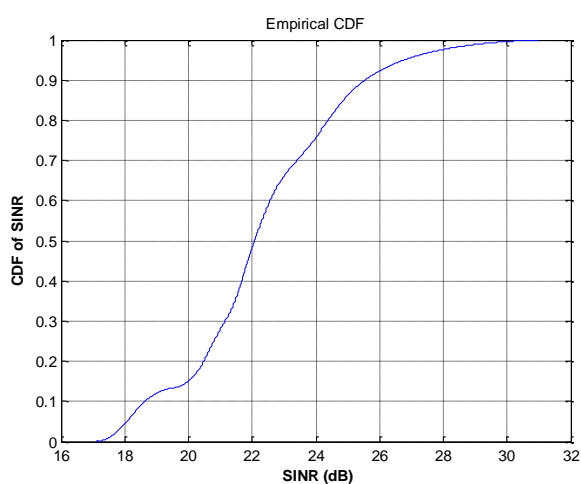


Figura 98: CDF SINR, escenario D.3\_250

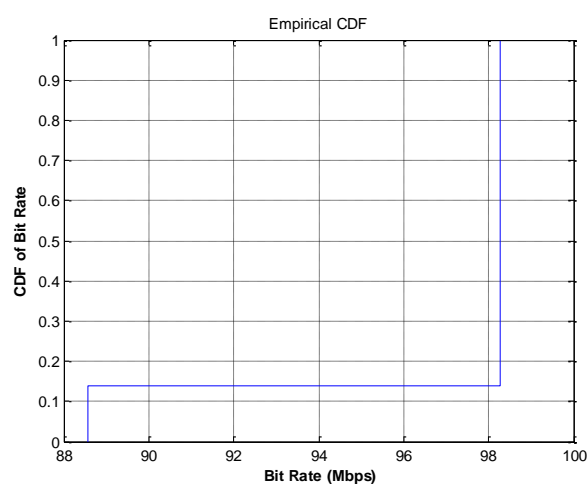


Figura 99: CDF Bit Rate, escenario D.3\_250

Este escenario es el que menos sufre las interferencias provocadas por la macrocelda, por lo que sus resultados son los que más se acercan al escenario sin macrocelda. El nivel de tasa binaria es el máximo en todas las habitaciones del piso exceptuando la habitación de invitados y, en menor parte, el aseo.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	30.9915 dB	17.1124 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

## 5.5.5 Macrocelda a 500 metros

### 5.5.5.1 Planta superior

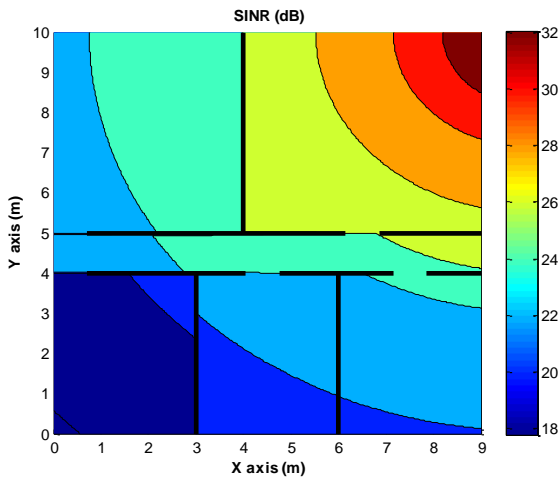


Figura 100: SINR, escenario D.1\_500

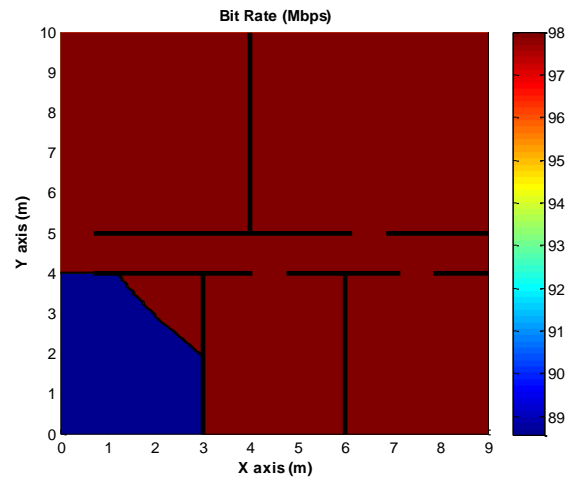


Figura 101: Bit Rate, escenario D.1\_500

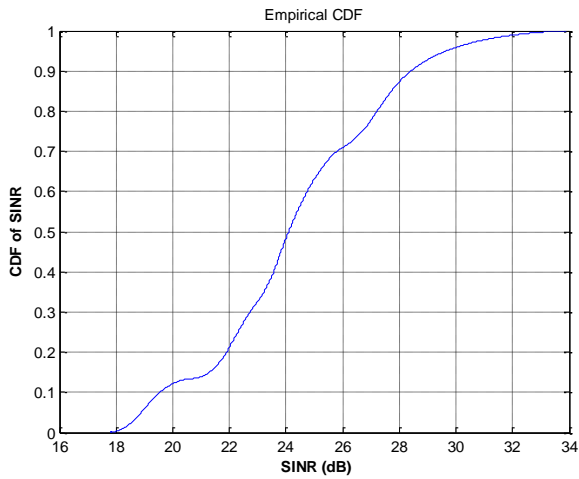


Figura 102: CDF SINR, escenario D.1\_500

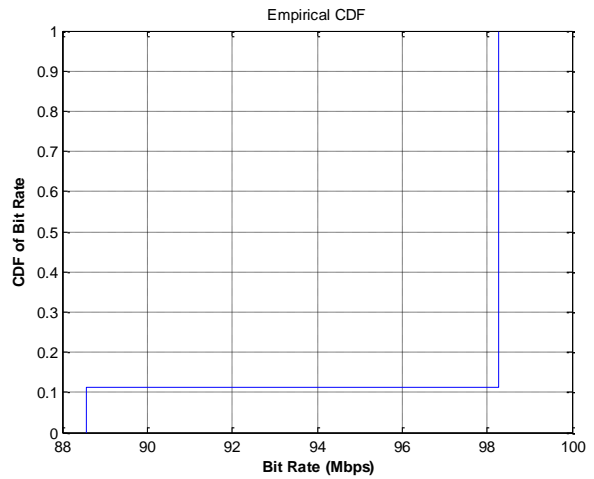


Figura 103: CDF Bit Rate, escenario D.1\_500

Con la macrocelda situada a 500 metros las pérdidas que sufre esta señal interferente son mínimas, por lo que los resultados son prácticamente iguales los del escenario sin macrocelda, diferenciándose el SINR en milésimas. Debido a esta pequeña diferencia, los niveles de tasa binaria son iguales.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	33.9118 dB	17.7925 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

### 5.5.5.2 Planta del medio

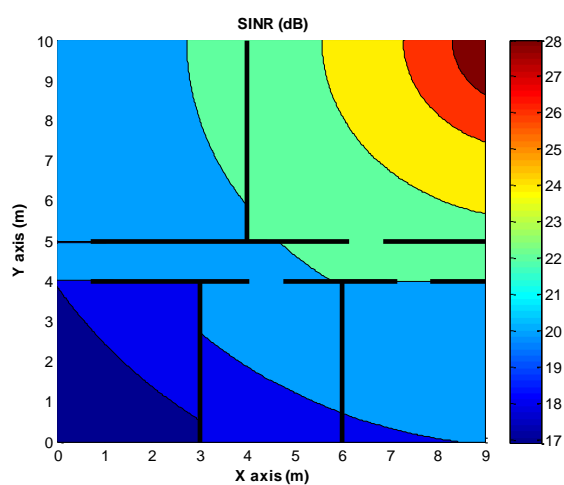


Figura 104: SINR, escenario D.2\_500

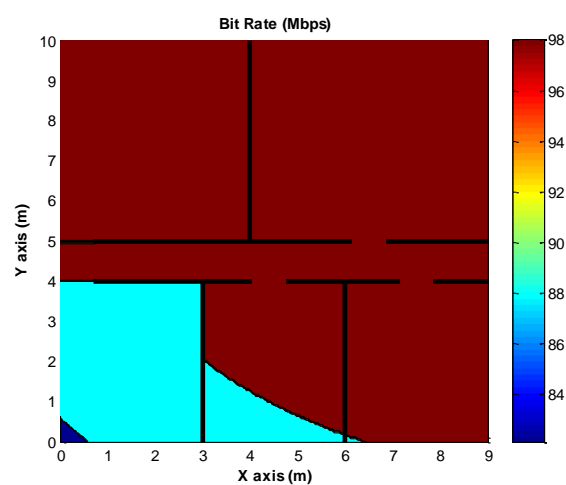


Figura 105: Bit Rate, escenario D.2\_500

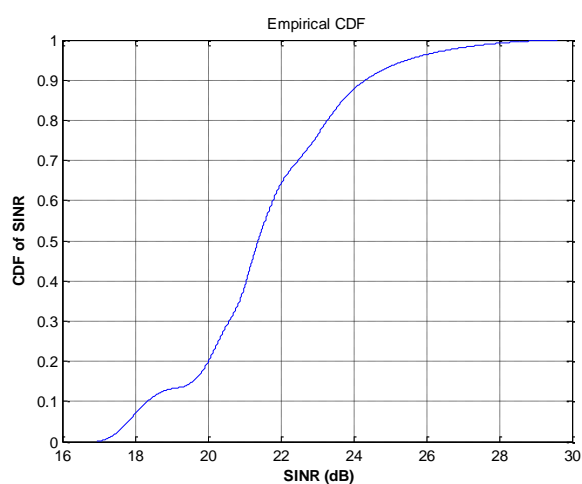


Figura 106: CDF SINR, escenario D.2\_500

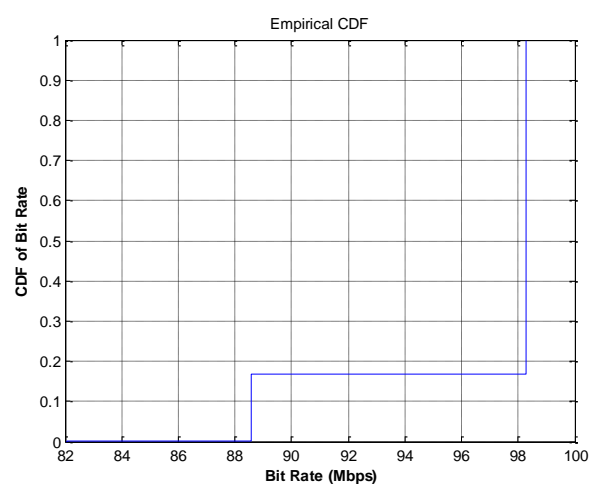


Figura 107: CDF Bit Rate, escenario D.2\_500

Al igual que ha pasado con la planta superior, las diferencias de este escenario con su homónimo sin macrocelda son mínimas, ya que las pérdidas que sufre la señal de la macrocelda son altas. Debido a que es la planta que tiene más cerca las femtoceldas interferentes, es la planta con peor nivel de SINR de las tres.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	29.5936 dB	16.9285 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

### 5.5.5.3 Planta inferior

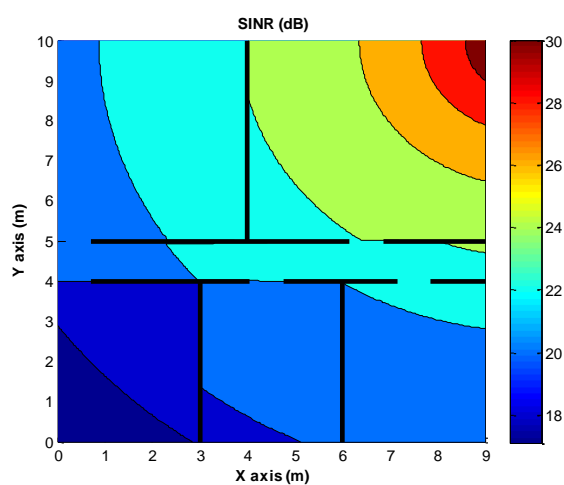


Figura 108: SINR, escenario D.3\_500

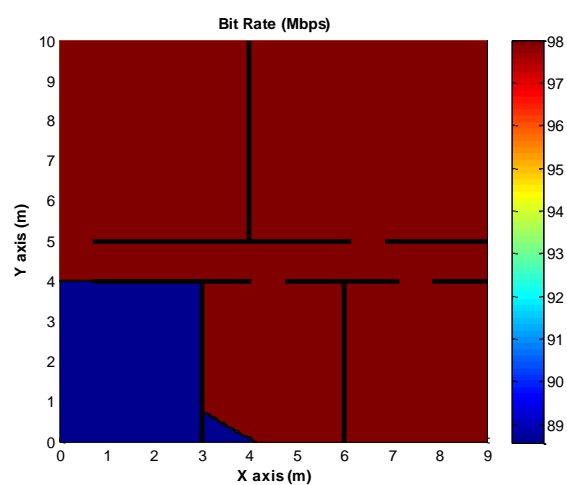


Figura 109: Bit Rate, escenario D.3\_500

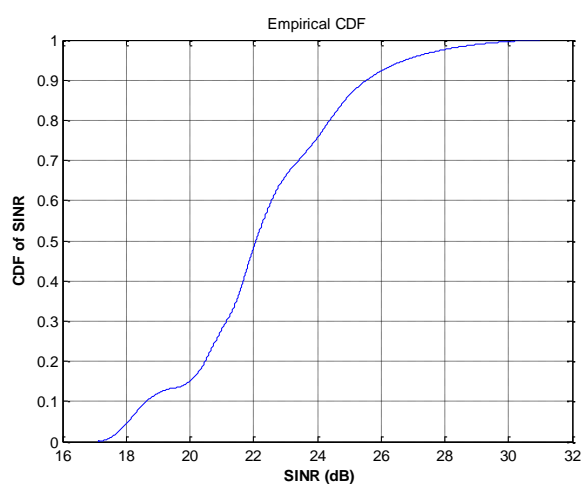


Figura 110: CDF SINR, escenario D.3\_500

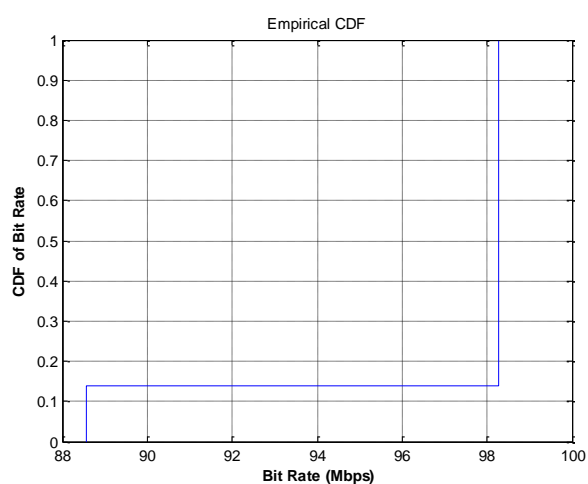


Figura 111: CDF Bit Rate, escenario D.3\_500

En la planta inferior los niveles de SINR únicamente se diferencian del caso sin macrocelda en el mínimo y de forma casi imperceptible, por lo que se podría decir que en este escenario la señal interferente de la macrocelda es imperceptible y no afecta a la calidad de la señal.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	30.9932 dB	17.1134 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

## 5.6 Tres edificios y macrocelda, edificio lateral

### 5.6.1 Macrocelda a 10 metros

#### 5.6.1.1 Planta superior

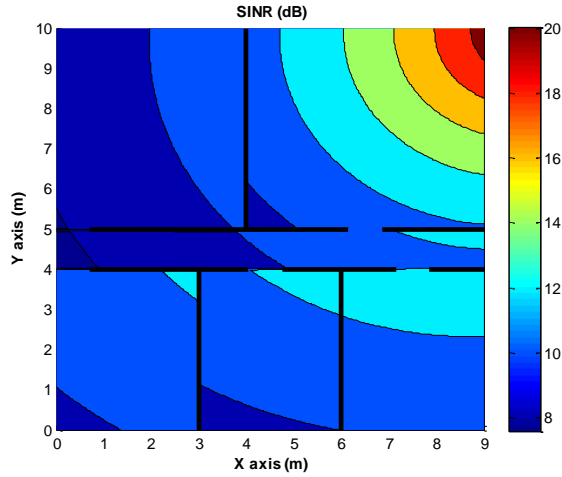


Figura 112: SINR, escenario E.1\_10

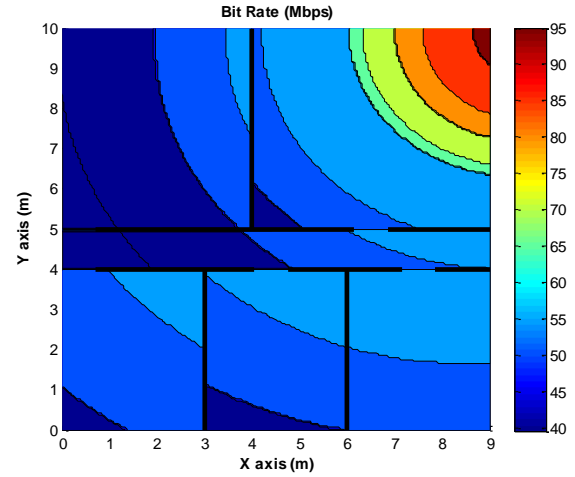


Figura 113: Bit Rate, escenario E.1\_10

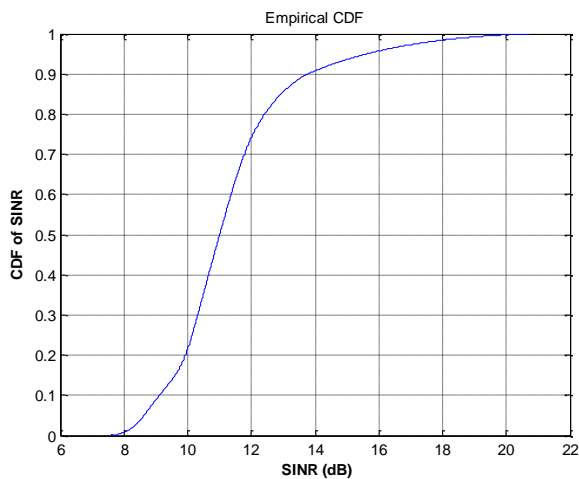


Figura 114: CDF SINR, escenario E.1\_10

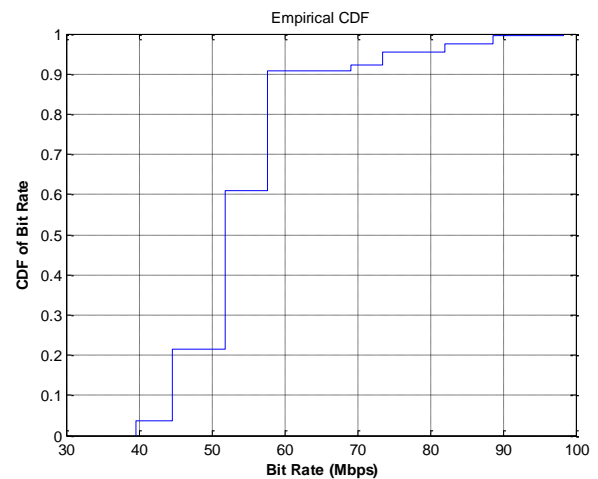


Figura 115: CDF Bit Rate, escenario E.1\_10

Como se puede observar, los niveles de SINR en este escenario son mejores que en el caso del edificio central con macrocelda a 10 metros. Esto es debido a que el ángulo formado por la macrocelda y el edificio hace que la ganancia sea mínima.

	MÁXIMO	MÍNIMO
SINR	20.7113 dB	07.5891 dB
TASA BINARIA	98.2800 Mbps	39.6000 Mbps

### 5.6.1.2 Planta del medio

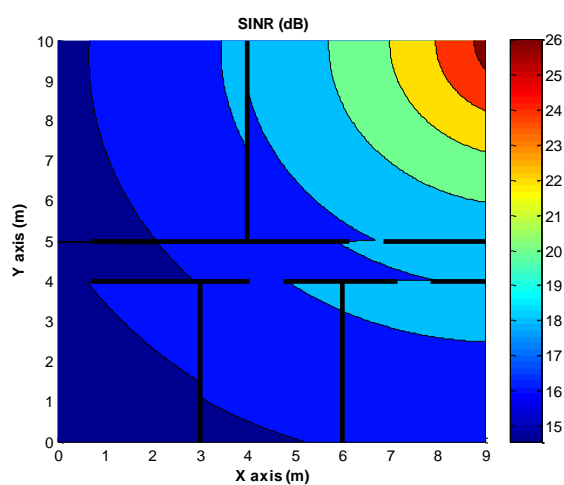


Figura 116: SINR, escenario E.2\_10

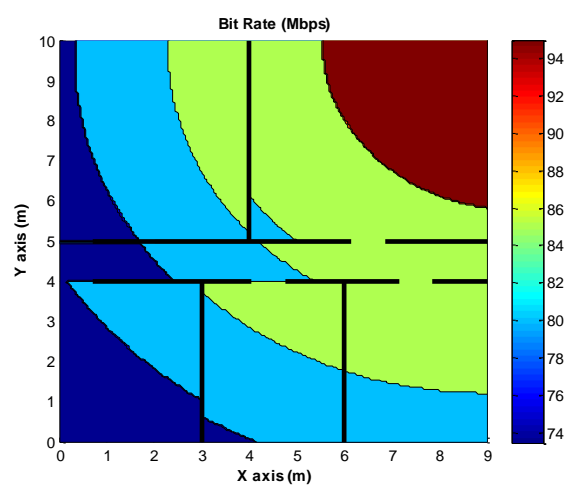


Figura 117: Bit Rate, escenario E.2\_10

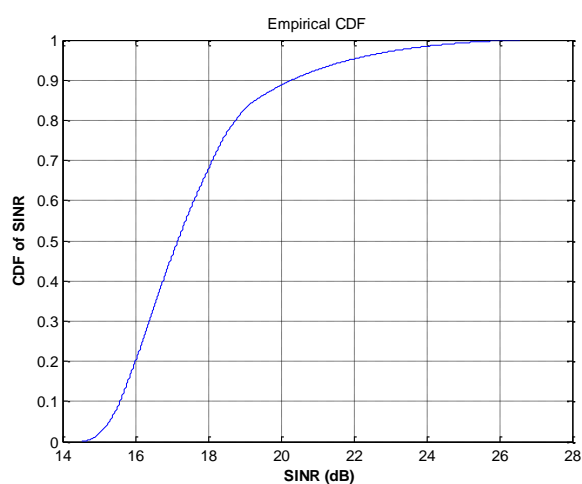


Figura 118: CDF SINR, escenario E.2\_10

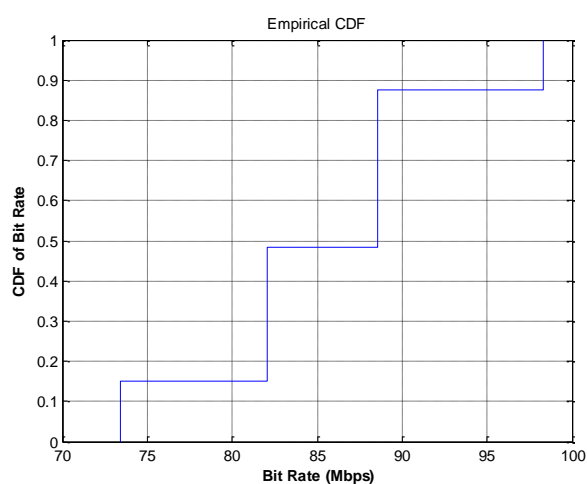


Figura 119: CDF Bit Rate, escenario E.2\_10

La planta del medio también sufre un aumento en su calidad de señal con respecto al caso del edificio central con macrocelda, con unas velocidades de transmisión de datos notablemente mayores a los obtenidos para la planta superior. Esto es debido a que la señal de la macrocelda sufre más atenuaciones que cuando incide sobre la planta superior.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	26.5657 dB	14.5088 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	73.4400 Mbps



### 5.6.1.3 Planta inferior

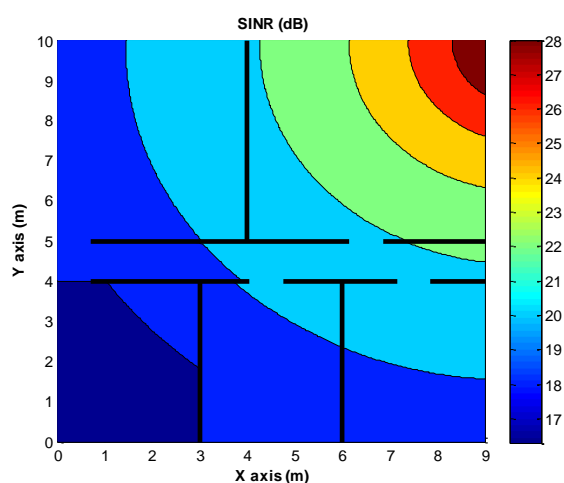


Figura 120: SINR, escenario E.3\_10

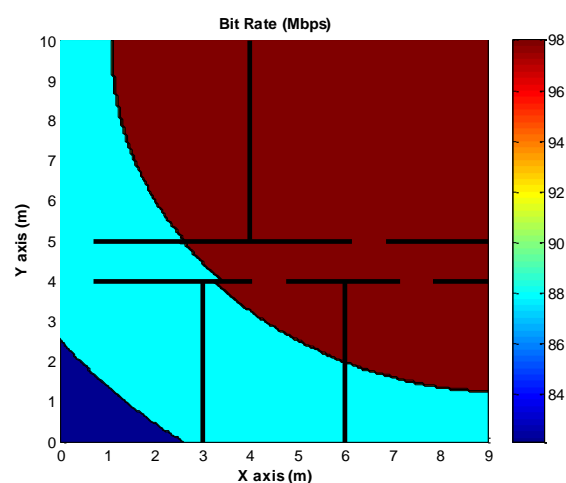


Figura 121: Bit Rate, escenario E.3\_10

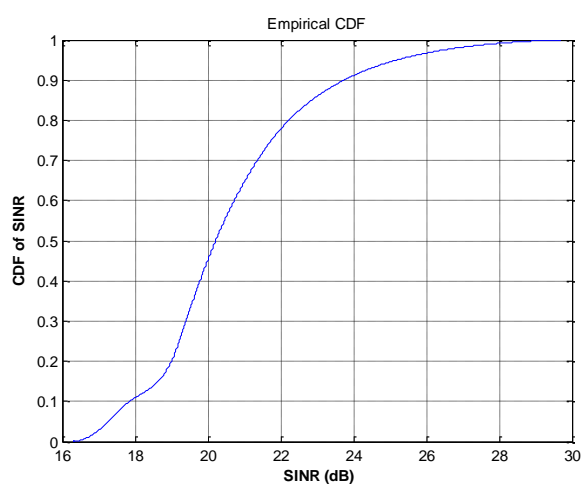


Figura 122: CDF SINR, escenario E.3\_10

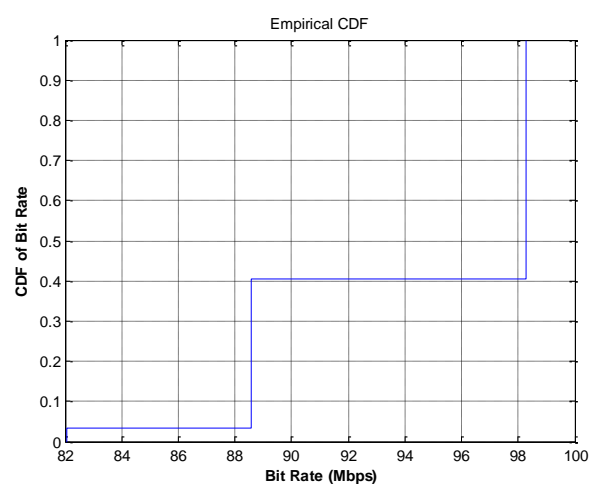


Figura 123: CDF Bit Rate, escenario E.3\_10

Para este escenario, el piso de la planta inferior es el que presenta mejores niveles de SINR de los tres, ya que es donde menos nivel de señal interferente se recibe. Esto se traduce a que haya bastantes zonas que puedan hacer uso de la velocidad máxima de transmisión de datos de 98.28 Mbps.

	MÁXIMO	MÍNIMO
SINR	29.6925 dB	16.2940 dB
TASA BINARIA	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

## 5.6.2 Macrocelda a 50 metros

### 5.6.2.1 Planta superior

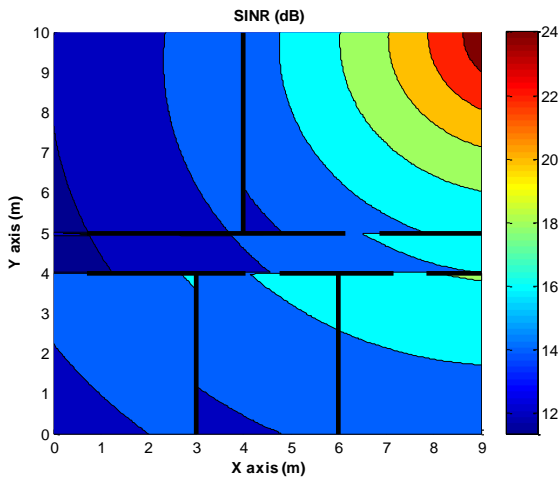


Figura 124: SINR, escenario E.1\_50

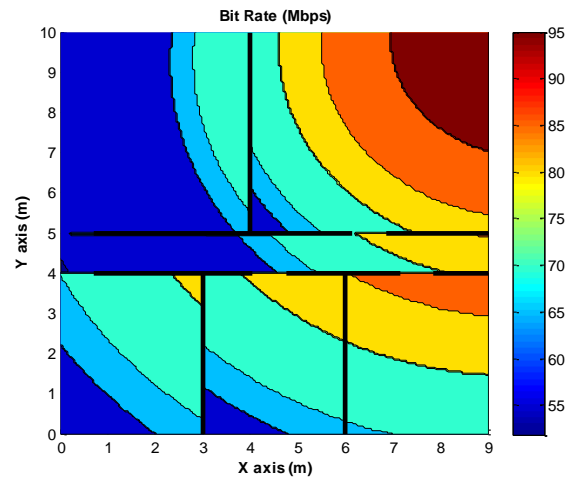


Figura 125: Bit Rate, escenario E.1\_50

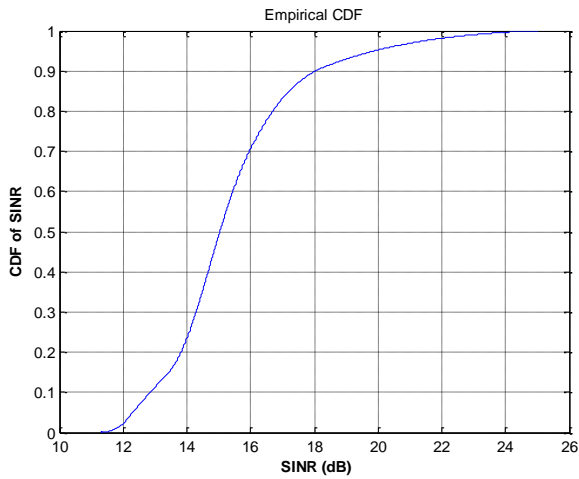


Figura 126: CDF SINR, escenario E.1\_50

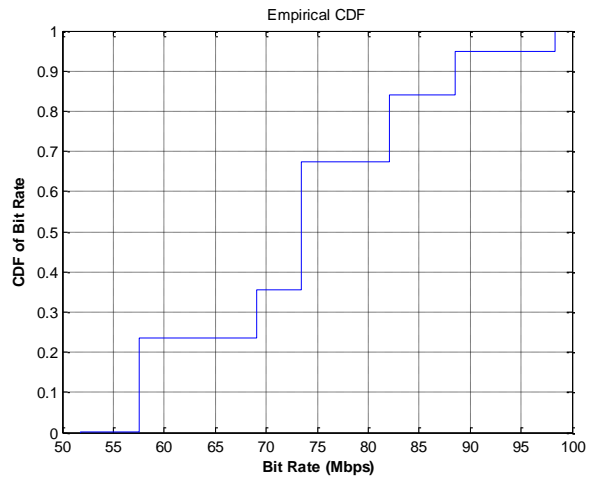


Figura 127: CDF Bit Rate, escenario E.1\_50

Al encontrarse la antena de la macrocelda más alejada, la calidad de señal recibida en el piso aumenta con respecto al caso de la macrocelda a 10 metros y, dado que el ángulo sigue siendo grande y por consiguiente la ganancia de la antena mínima, se mejoran los resultados obtenidos en el edificio central.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	25.0095 dB	11.3120 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	51.8400 Mbps

### 5.6.2.2 Planta del medio

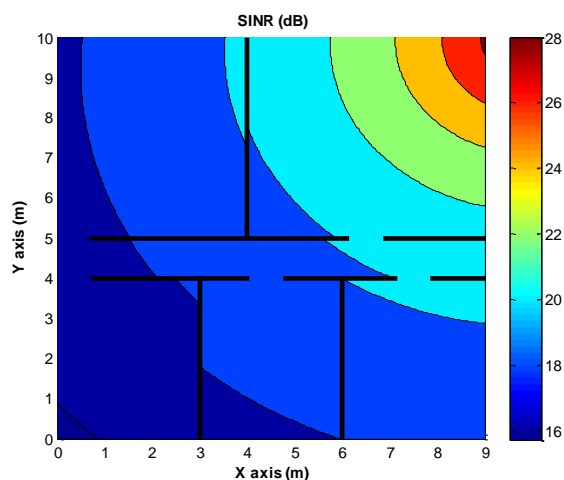


Figura 128: SINR, escenario E.2\_50

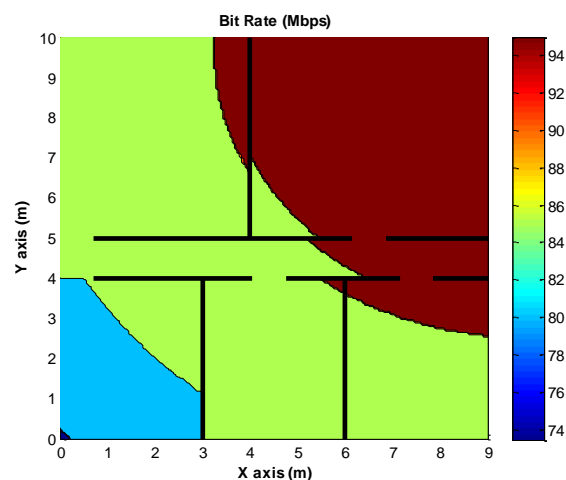


Figura 129: Bit Rate, escenario E.2\_50

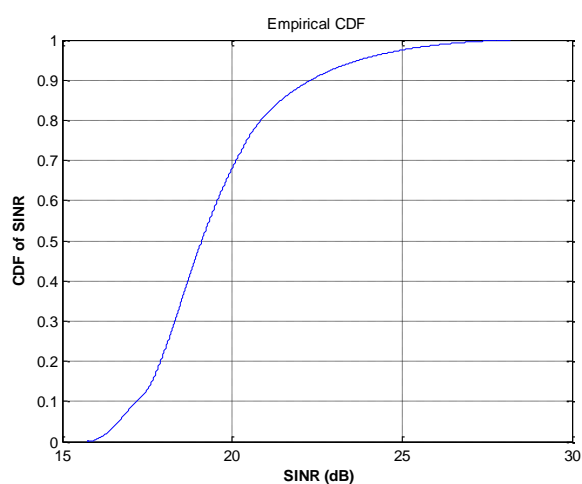


Figura 130: CDF SINR, escenario E.2\_50

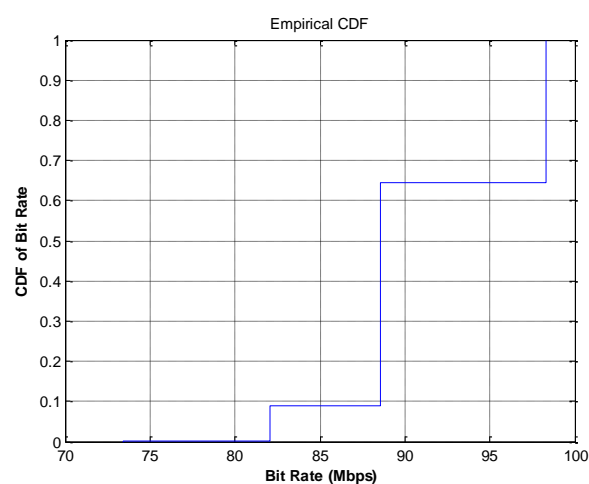


Figura 131: CDF Bit Rate, escenario E.2\_50

A diferencia de lo que sucedía en el caso del edificio central, el salto de distancia de 10 a 50 metros de la macrocelda no provoca un empeoramiento de señal ya que, aunque sí que se reduzca el ángulo de incidencia, no lo hace lo suficiente como para que la ganancia de la macrocelda haga llegar un nivel de señal interferente mayor que en el caso de 10 metros.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	28.2005 dB	15.7305 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	73.4400 Mbps

### 5.6.2.3 Planta inferior

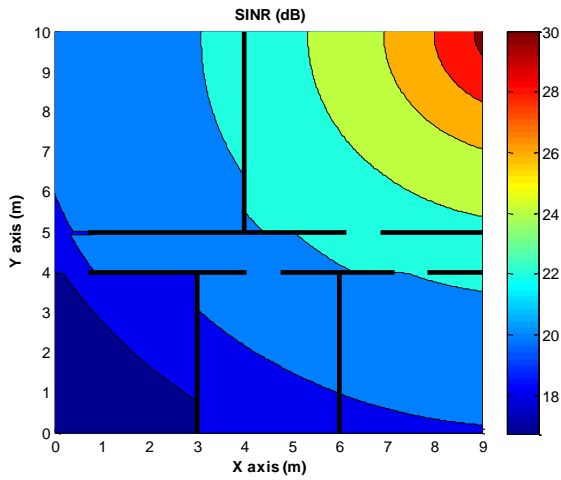


Figura 132: SINR, escenario E.3\_50

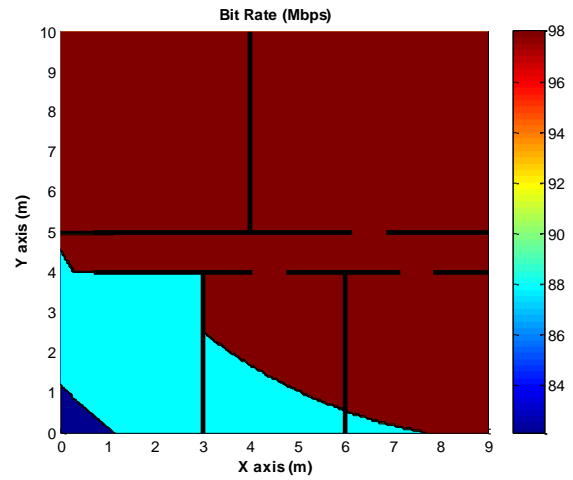


Figura 133: Bit Rate, escenario E.3\_50

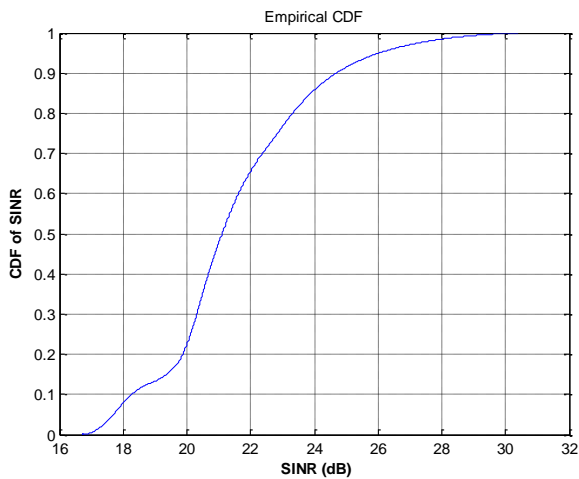


Figura 134: CDF SINR, escenario E.3\_50

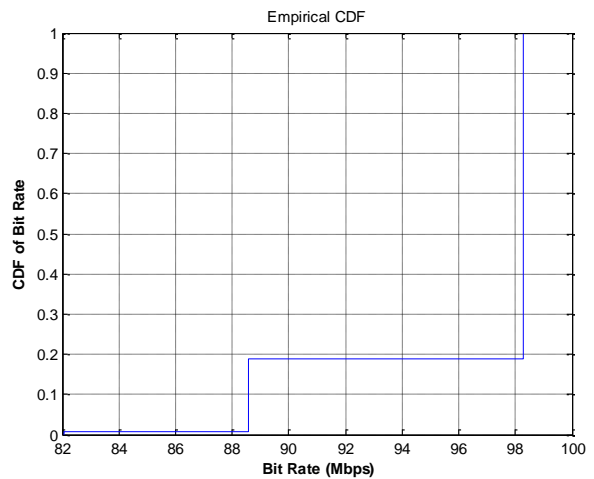


Figura 135: CDF Bit Rate, escenario E.3\_50

En este escenario los niveles de SINR son bastante superiores a los obtenidos para el edificio central con macrocelda a 50 metros. Este incremento se produce por el mismo hecho que en el caso anterior de la plante del medio, en el que el ángulo de incidencia de la señal de la macrocelda no es lo suficientemente pequeño como para aumentar la ganancia e influir en el nivel de señal interferente.

	MÁXIMO	MÍNIMO
SINR	30.4040 dB	16.7247 dB
TASA BINARIA	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

## 5.6.3 Macrocelda a 100 metros

### 5.6.3.1 Planta superior

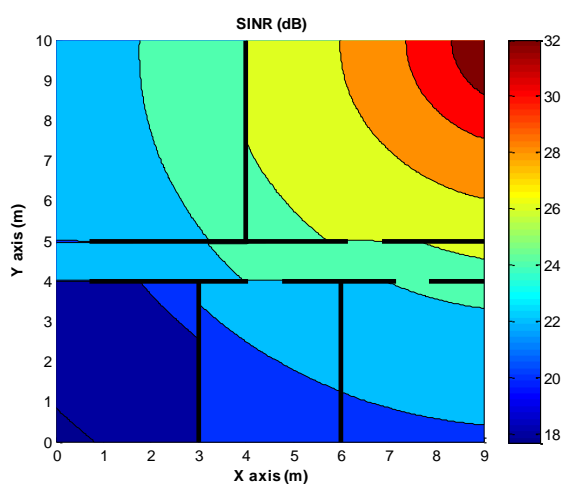


Figura 136: SINR, escenario E.1\_100

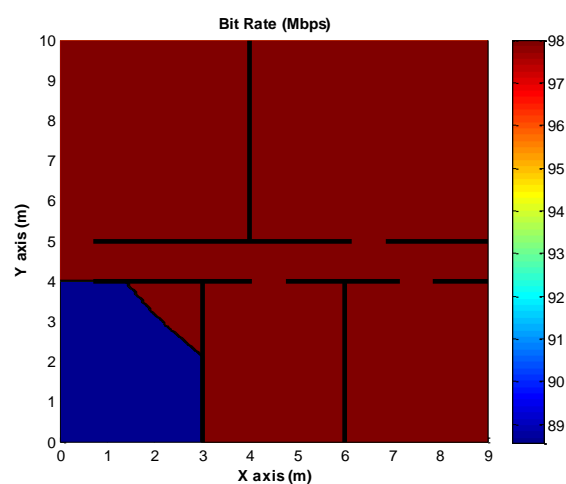


Figura 137: Bit Rate, escenario E.1\_100

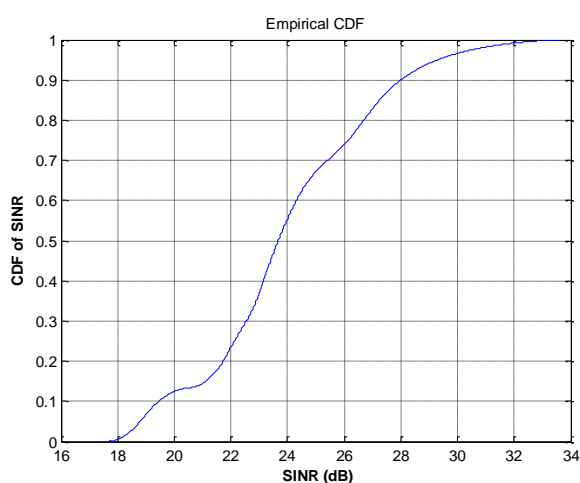


Figura 138: CDF SINR, escenario E.1\_100

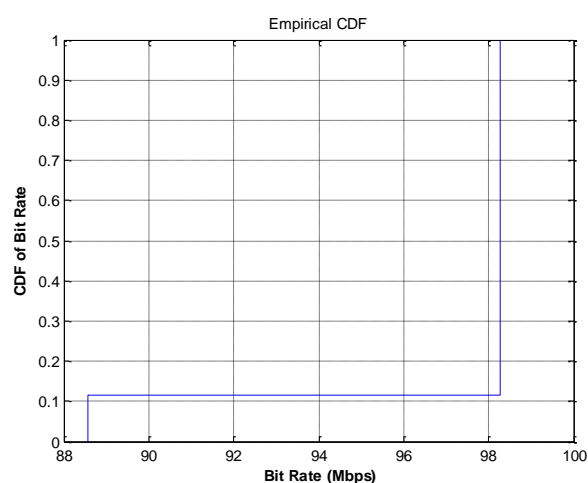


Figura 139: CDF Bit Rate, escenario E.1\_100

En este caso, a diferencia del escenario del edificio central, los efectos de la señal interferente proveniente de la macrocelda no son notables gráficamente. Aunque los valores de SINR son menores que en el escenario sin macrocelda, no lo son lo suficiente como para que la tasa binaria baje con respecto a dicho escenario.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	33.6133 dB	17.7005 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

### 5.6.3.2 Planta del medio

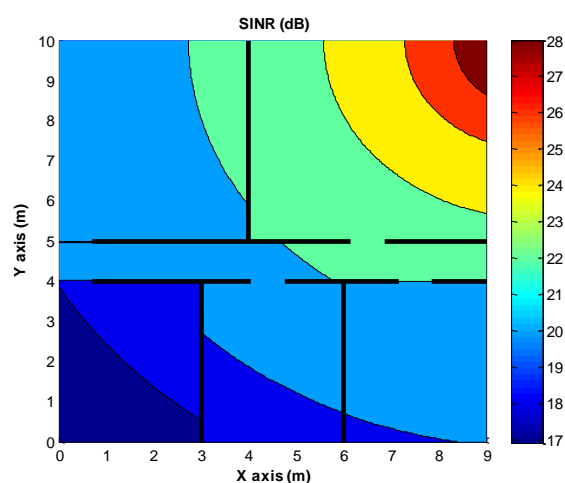


Figura 140: SINR, escenario E.2\_100

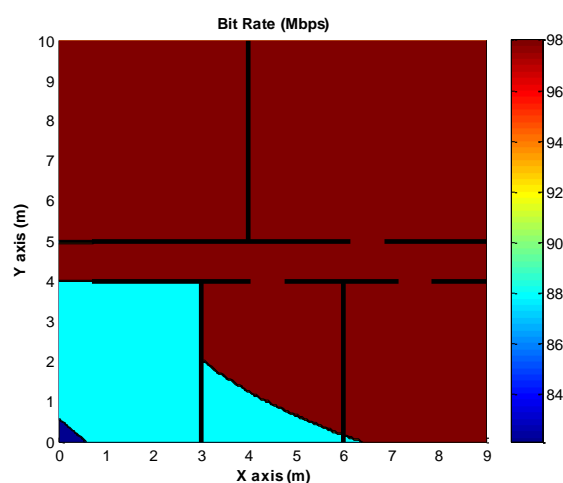


Figura 141: Bit Rate, escenario E.2\_100

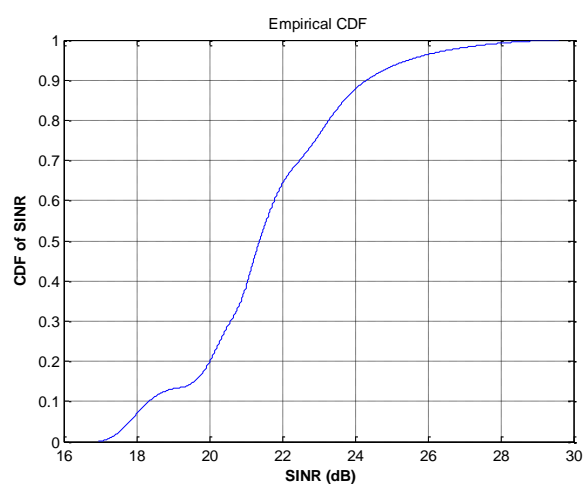


Figura 142: CDF SINR, escenario E.2\_100

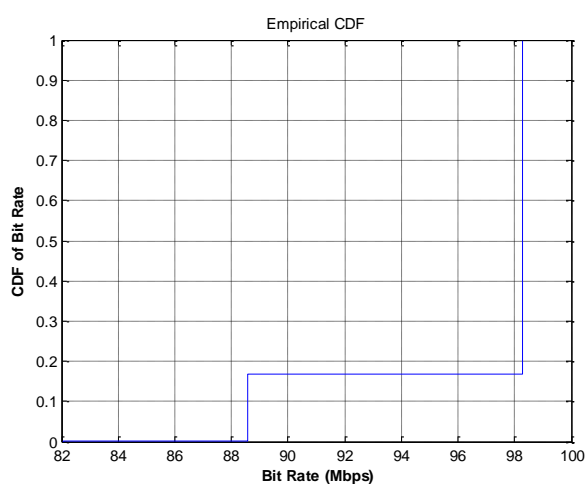


Figura 143: CDF Bit Rate, escenario E.2\_100

Este escenario presenta mejores niveles de calidad de señal que con la macrocelda situada a 50 metros, alcanzándose la velocidad máxima de transmisión de datos en todas las habitaciones del piso exceptuando la de invitados y el aseo, lo que también supone una mejora con respecto al escenario del edificio central.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	29.5912 dB	16.9300 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

### 5.6.3.3 Planta inferior

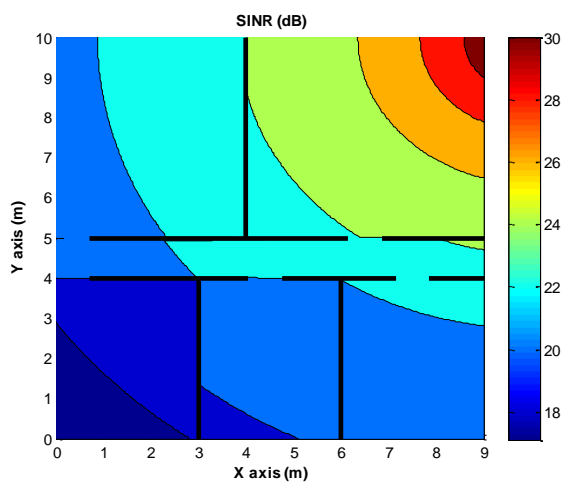


Figura 144: SINR, escenario E.3\_100

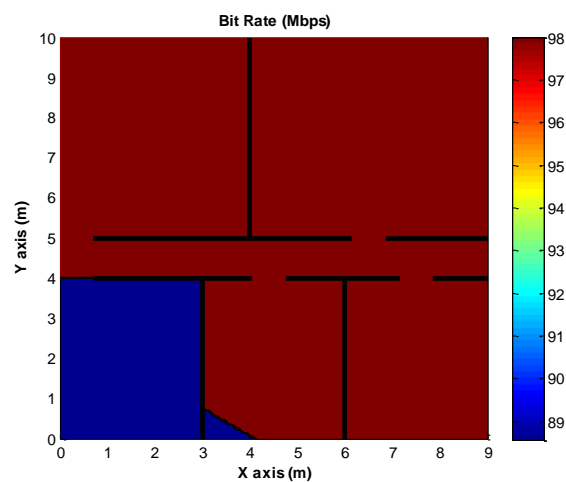


Figura 145: Bit Rate, escenario E.3\_100

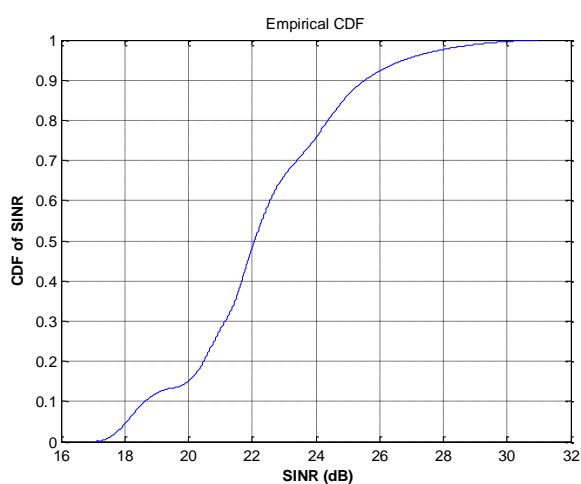


Figura 146: CDF SINR, escenario E.3\_100

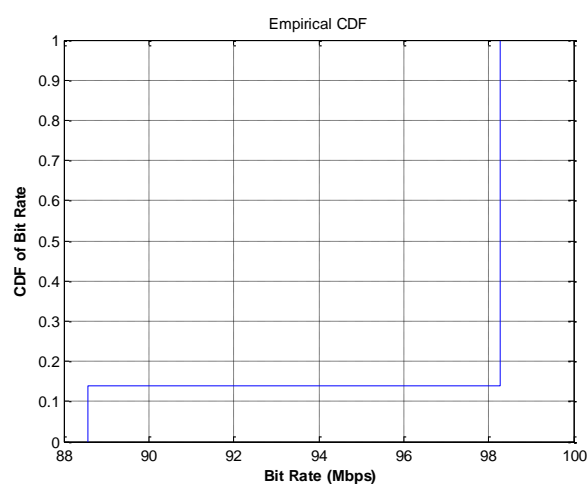


Figura 147: CDF Bit Rate, escenario E.3\_100

Dado que la planta inferior es, comparado con las otras dos plantas, la que menos interferencias provocadas por la macrocelda sufre, el nivel de SINR está muy cerca de los obtenidos en el escenario sin macrocelda interferente y, por consiguiente, los valores de tasa binaria son altos en todo el piso.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	30.9921 dB	17.1162 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

## 5.6.4 Macrocelda a 250 metros

### 5.6.4.1 Planta superior

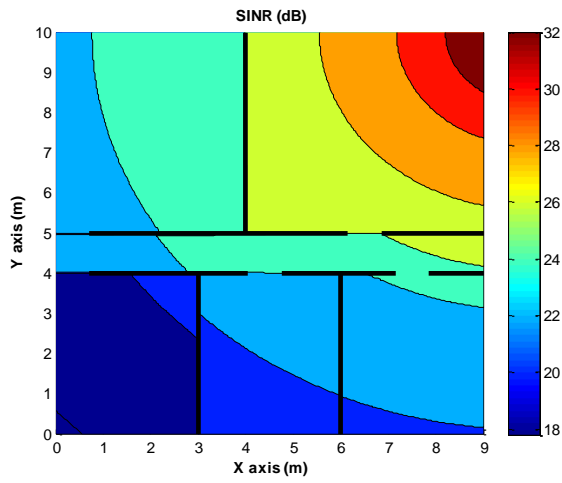


Figura 148: SINR, escenario E.1\_250

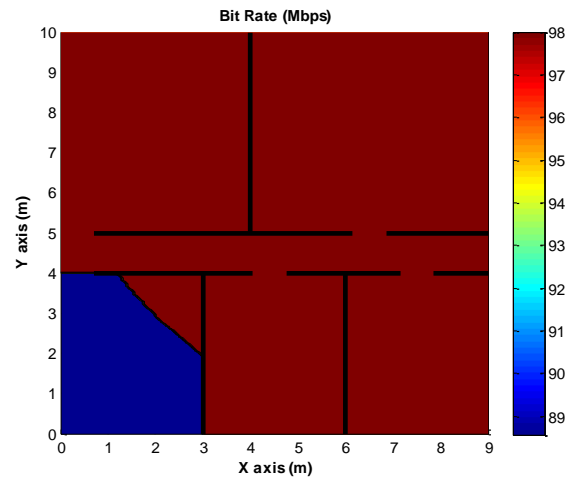


Figura 149: Bit Rate, escenario E.1\_250

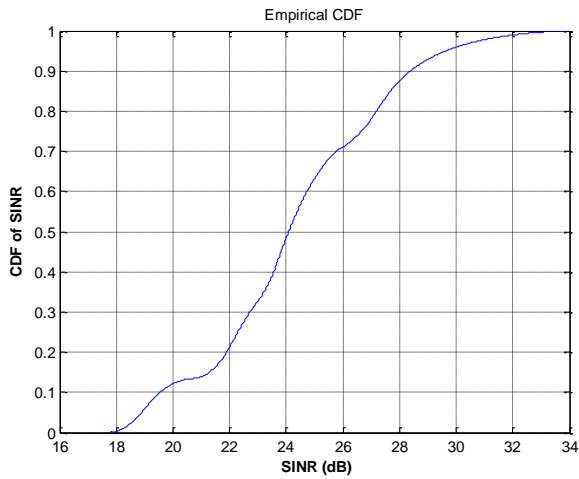


Figura 150: CDF SINR, escenario E.1\_250

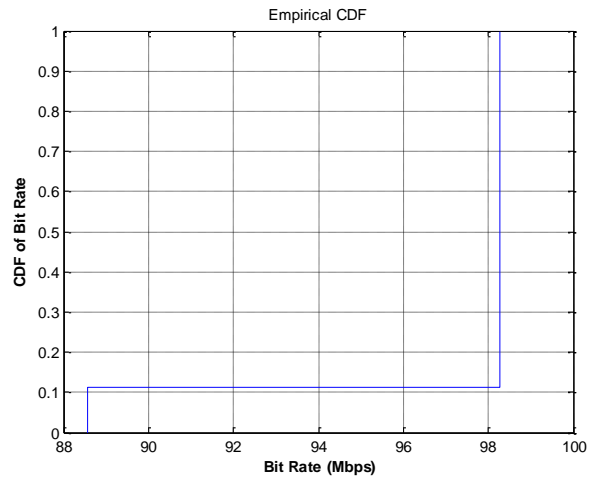


Figura 151: CDF Bit Rate, escenario E.1\_250

Para la planta superior, los efectos de la macrocelda empiezan a ser mínimos a 250 metros, por lo que se mejoran los resultados obtenidos en la sección anterior y se empiezan a conseguir valores muy cercanos a los calculados sin macrocelda.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	33.8797 dB	17.7957 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps



### 5.6.4.2 Planta del medio

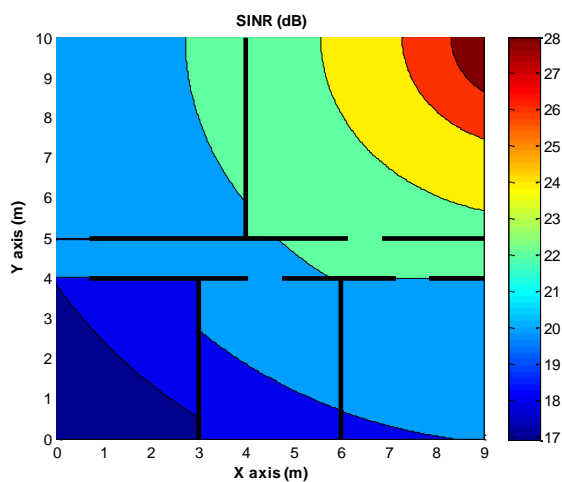


Figura 152: SINR, escenario E.2\_250

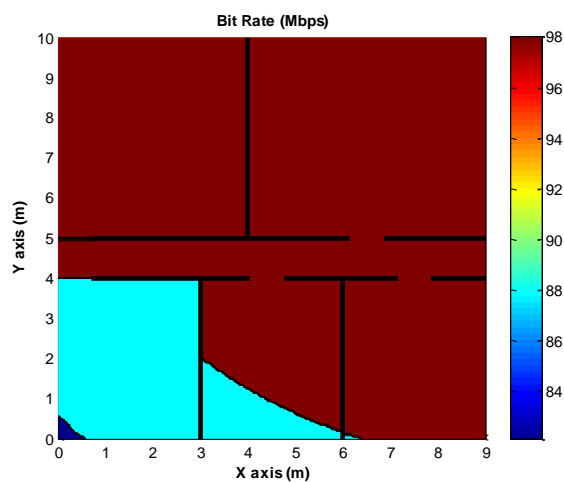


Figura 153: Bit Rate, escenario E.2\_250

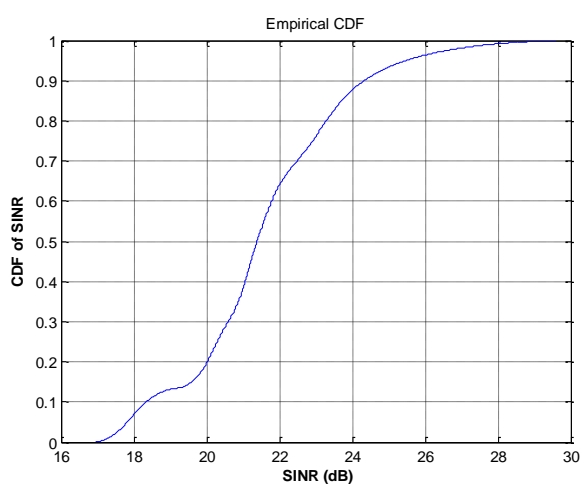


Figura 154: CDF SINR, escenario E.2\_250

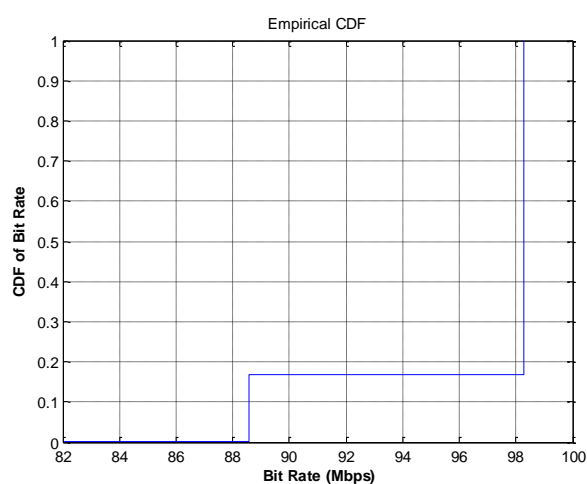


Figura 155: CDF Bit Rate, escenario E.2\_250

En este caso, el nivel de calidad obtenida es levemente mayor que en el escenario con la macrocelda situada a 100 metros, lo que provoca que las gráficas sean parecidas y los valores máximo y mínimo de SINR aumenten en milésimas.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	29.5935 dB	16.9318 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

### 5.6.4.3 Planta inferior

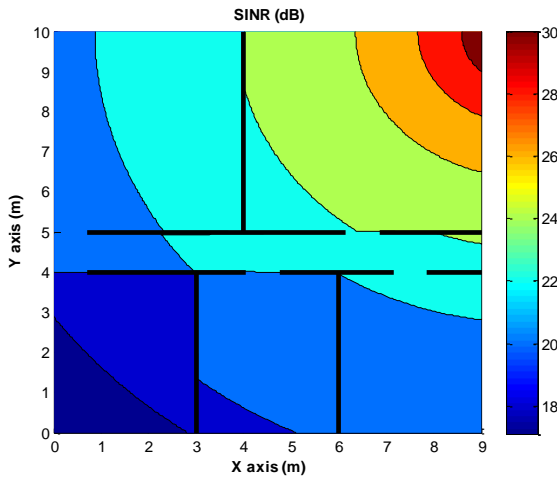


Figura 156: SINR, escenario E.3\_250

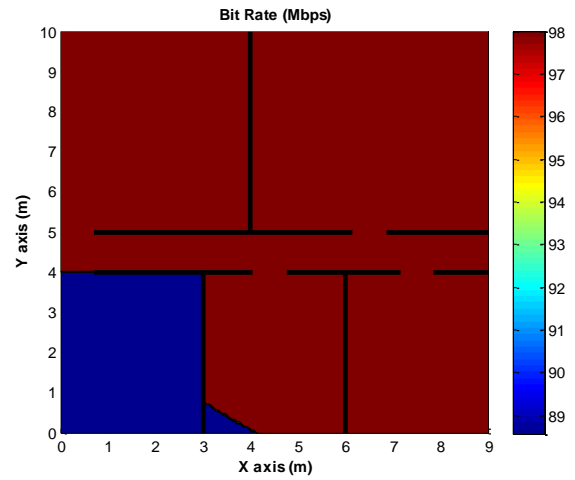


Figura 157: Bit Rate, escenario E.3\_250

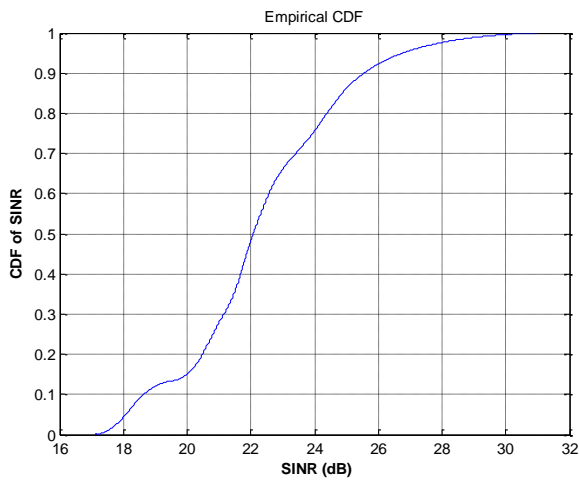


Figura 158: CDF SINR, escenario E.3\_250

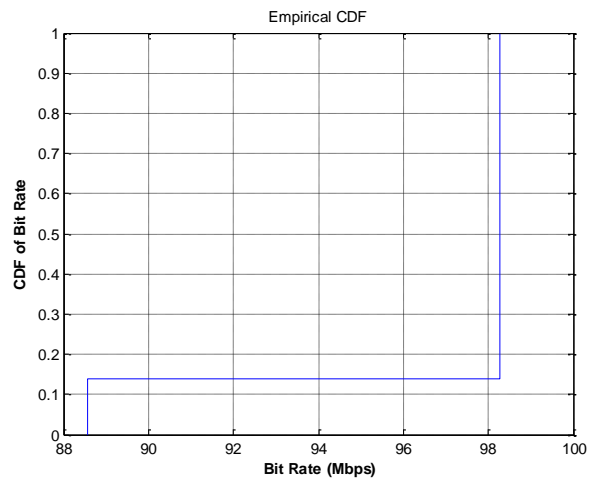


Figura 159: CDF Bit Rate, escenario E.3\_250

En la planta inferior los valores de SINR son prácticamente idénticos a los obtenidos en el escenario sin macrocelda, diferenciándose únicamente en el máximo. Esto es debido a que el nivel de señal interferente proveniente de la macrocelda es mínimo.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	30.9933 dB	17.1169 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

## 5.6.5 Macrocelda a 500 metros

### 5.6.5.1 Planta superior

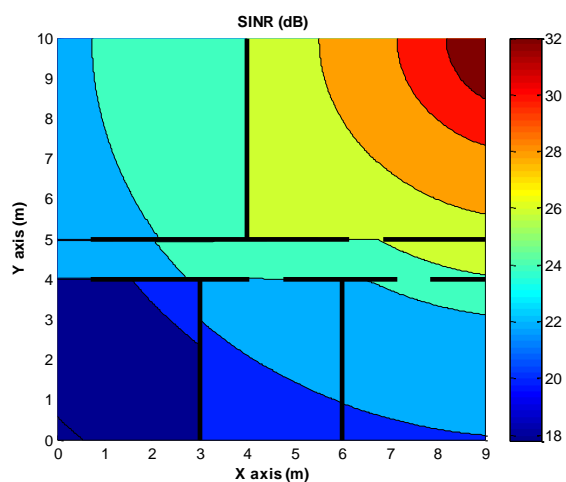


Figura 160: SINR, escenario E.1\_500

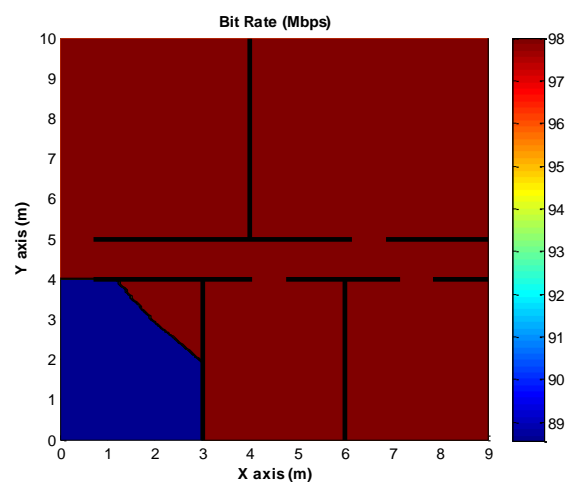


Figura 161: Bit Rate, escenario E.1\_500

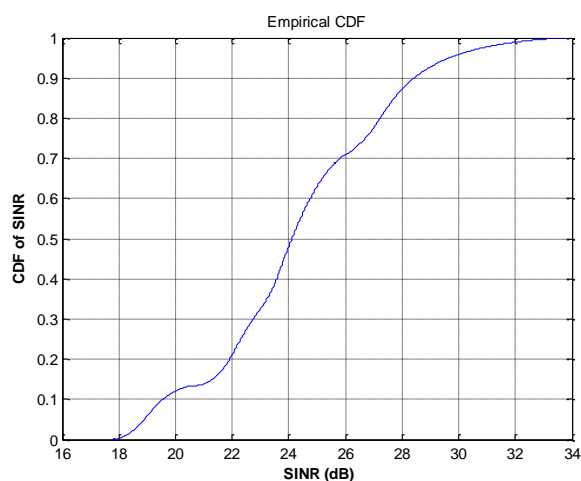


Figura 162: CDF SINR, escenario E.1\_500

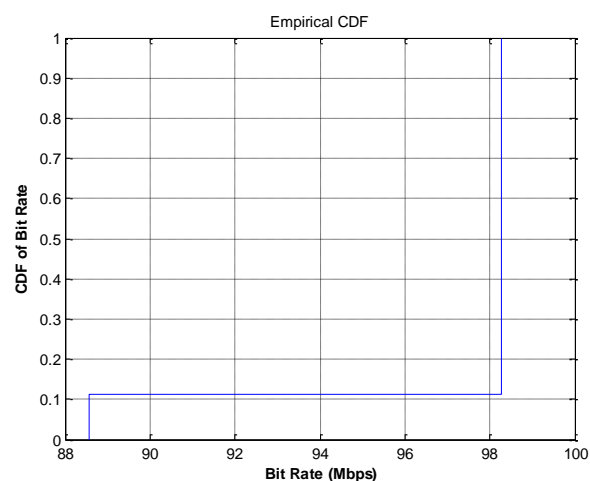


Figura 163: CDF Bit Rate, escenario E.1\_500

Con la macrocelda situada a 500 metros, los niveles de SINR se acercan a los que presenta el escenario sin macrocelda, aunque no llegan a ser iguales. Esta diferencia no es perceptible en la tasa binaria que se consigue en todo el piso.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	33.9155 dB	17.7985 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps

### 5.6.5.2 Planta del medio

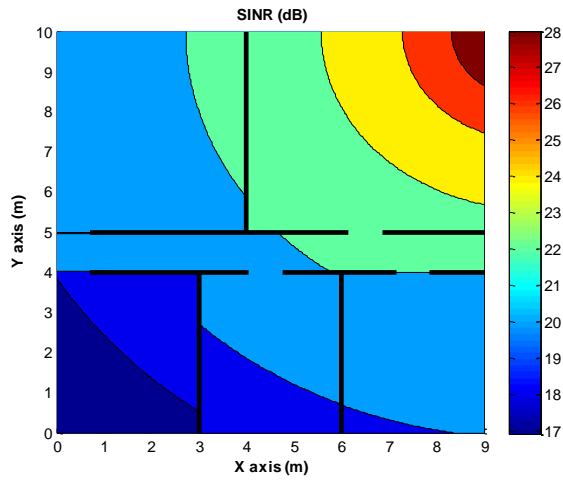


Figura 164: SINR, escenario E.2\_500

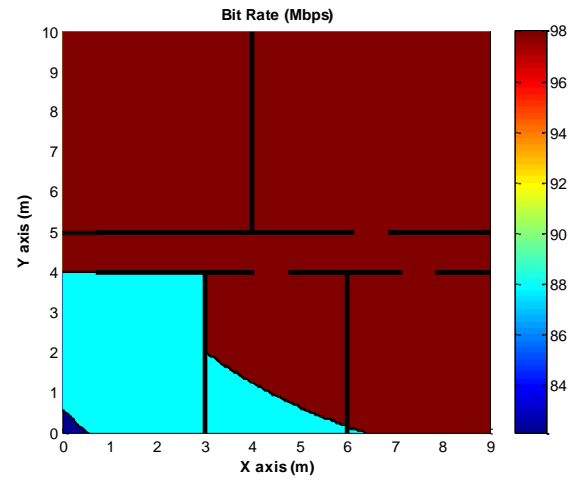


Figura 165: Bit Rate, escenario E.2\_500

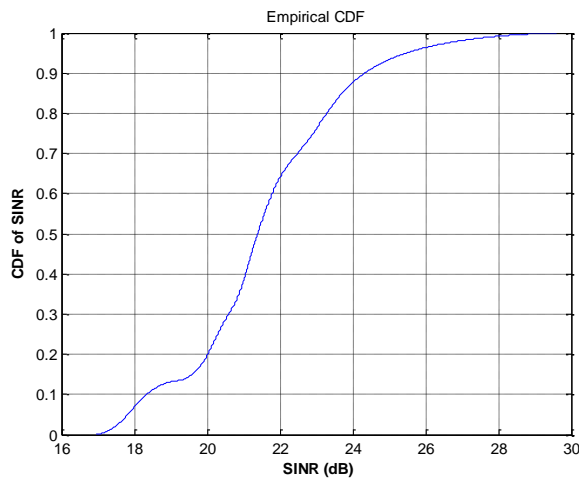


Figura 166: CDF SINR, escenario E.2\_500

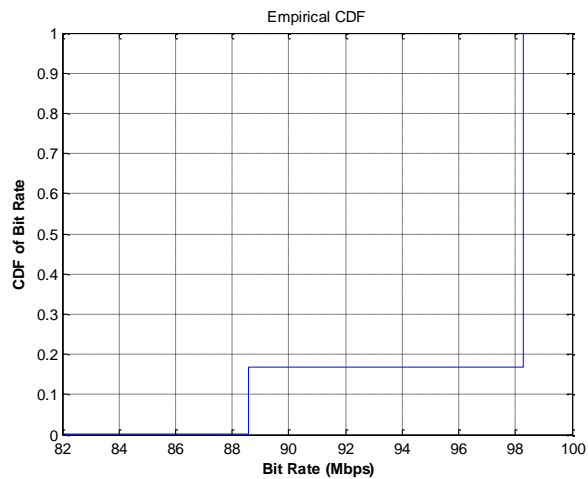


Figura 167: CDF Bit Rate, escenario E.2\_500

En este escenario los niveles de SINR únicamente se diferencian en una diezmilésima con respecto al escenario sin macrocelda, ya que la señal proveniente de ésta sufre muchas pérdidas hasta llegar al piso. Los valores obtenidos de tasa binaria no se diferencian de los calculados sin macrocelda.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	29.5938 dB	16.9318 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	82.0800 Mbps

### 5.6.5.3 Planta inferior

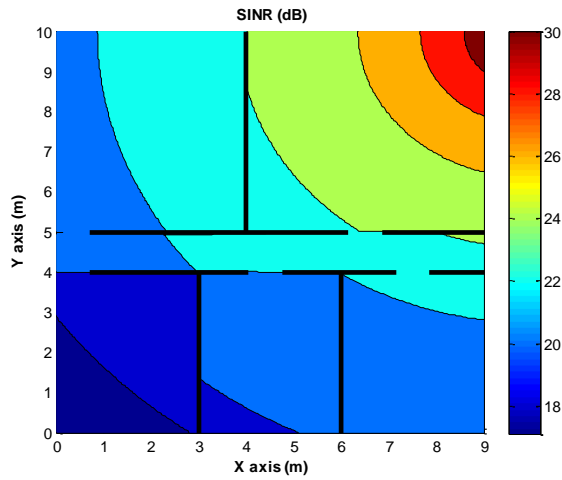


Figura 168: SINR, escenario E.3\_500

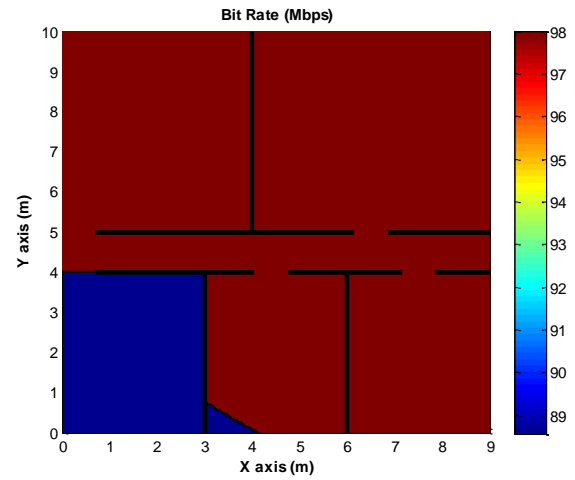


Figura 169: Bit Rate, escenario E.3\_500

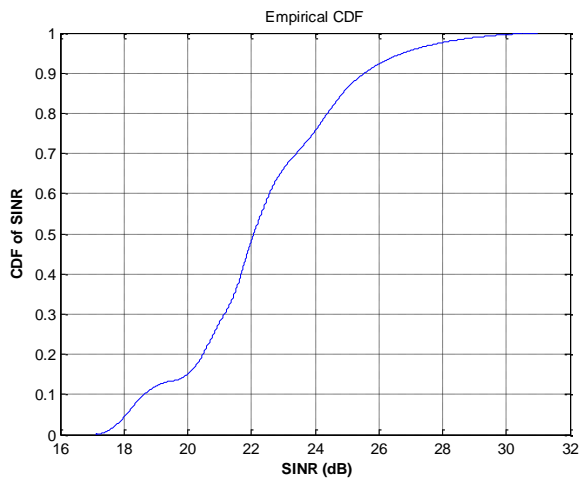


Figura 170: CDF SINR, escenario E.3\_500

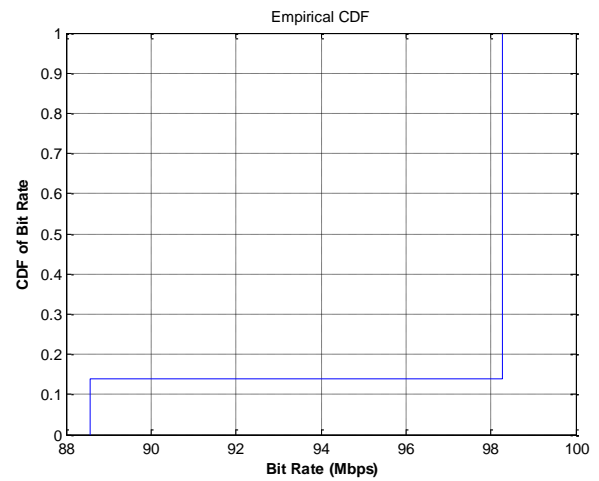


Figura 171: CDF Bit Rate, escenario E.3\_500

Ya que, como se ha mencionado anteriormente, la planta inferior es la que menos señal interferente proveniente de la macrocelda sufre, al estar ésta a 500 metros dicha señal interferente no afecta al nivel de SINR, por lo que los resultados obtenidos son iguales a los calculados en el escenario sin macrocelda.

	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>SINR</b>	30.9935 dB	17.1169 dB
<b>TASA BINARIA</b>	98.2800 Mbps	88.5600 Mbps



## 6. CONCLUSIONES

A partir de la sección anterior de resultados, podemos observar que las fuentes de interferencia más influyentes son las provenientes de las macroceldas, ya que las femtoceldas influyen en el nivel de SINR y de tasa binaria pero de manera poco notable, proveyendo resultados de calidad más que aceptable para escenarios en los que no influyan las macroceldas.

Cabe destacar que las zonas que sufren más el efecto de las interferencias de las femtoceldas son las situadas en la planta media del edificio, como cabía esperar. Esto es principalmente debido a que es el escenario en el que todas las fuentes de interferencias debidas a femtoceldas se encuentran más cerca (de media) y, como se ha mencionado a lo largo de la memoria, la distancia es un factor clave en la atenuación de una señal, de manera que cuanta más distancia haya recorrido la señal mayor atenuación sufrirá.

Por otro lado, hay que mencionar que los pisos pertenecientes a las plantas superiores de los edificios tienen un mejor nivel de SINR y de tasa binaria que los que se encuentran en la planta baja. Esto es debido a que, a pesar de que ambas plantas tengan las femtoceldas interferentes situadas a la misma distancia, se ha considerado que las antenas de las femtoceldas tendrán una ganancia de transmisión de 3 dB cuando radien hacia abajo y de 0 dB cuando radien hacia arriba, teniendo en cuenta que están colocadas colgando del techo, es decir, apuntando hacia abajo. Este hecho hace que el nivel de señal interferente que llegue a la planta inferior sea mayor que el que llega a la planta superior, ya que la ganancia es un elemento clave en la fórmula de Friis (Sección 4.5).

También se ha comprobado que, en un escenario en el coexistan tres edificios, los niveles de SINR y de tasa binaria son mayores para los edificios laterales que para el central. Esto se debe principalmente a que, para el edificio central, las fuentes interferentes están más cerca que para uno de los edificios laterales, por lo que la señal de la femtocelda transmisora sufrirá más interferencias.

En los escenarios que se encuentran simulados con macroceldas, se puede observar un claro efecto de disminución en la calidad del servicio para distancias menores a 100 metros, teniendo que aumentar la potencia de la femtocelda de 10 mW a 100 mW en los casos de 10 metros y 50 metros para poder obtener un nivel de señal mínimo. Para estos escenarios la planta que sufre más interferencias es la superior, ya que se encuentra a menos distancia de la antena de la macrocelda que las demás.

Hay que denotar que, en el escenario descrito para la sección 5.4, la planta del medio y la inferior tienen peor calidad de señal con la macrocelda situada a 50 metros que con la macrocelda situada a 10 metros. A priori, lo normal sería que fuese al revés, ya que a mayor distancia más pérdidas de propagación sufre la señal. El hecho que hace que estas pérdidas no se noten es que la ganancia de la antena de la macrocelda depende del ángulo que forme el haz principal de dicha antena con el punto bajo estudio (sección 4.8), de manera que a mayor ángulo menor ganancia de transmisión, por lo que si la antena está más cerca del edificio el ángulo será mayor, mientras que si la antena se aleja el ángulo será menor y, por tanto, la ganancia mayor.

Este efecto de incremento de ganancia suple el aumento de las pérdidas de propagación en el caso de la macrocelda a 50 metros, pero ya en 100 metros las pérdidas vuelven a ser mayores, reduciendo de esta manera el nivel de señal interferente y aumentando el nivel de SINR en el piso. En el escenario descrito en para el apartado 5.5 no apreciamos este efecto ya que, aunque al alejar la macrocelda disminuya el ángulo, sigue siendo demasiado amplio como para que la ganancia de la antena aumente.

Por lo tanto, podemos determinar que el uso de las femtoceldas de LTE como solución al problema presente en las operadoras móviles de dar cobertura a entornos cerrados es viable para entornos en los que no haya macroceldas a menos de 100 metros de distancia, proporcionando una buena cobertura en todo el piso y



unas velocidades de transmisión de datos altas, además de no causar interferencias significativas con otras señales que operen a la misma frecuencia.

## 6.1 Trabajo futuro

Como posibles líneas de trabajo futuro se podría contemplar el estudio de interferencias multi-femtocelda en diferentes escenarios que, por ejemplo, tuviesen otra disposición de las frecuencias de trabajo repetidas, es decir, que en el escenario de tres edificios el central tuviese como frecuencia de trabajo en la planta baja  $f1$  y después se fuese alternando con  $f2$  mientras que en los edificios laterales la planta baja operase a  $f2$  y después se fuese alternando con  $f1$ .

También se podría estudiar el efecto que tendría sobre el SINR que la señal proveniente de la macrocelda o de la femtocelda de otro edificio atravesase una ventana en vez de una pared, como ha sido el caso simulado, o que la propia señal de la femtocelda, que da cobertura al piso de estudio, atravesase mobiliario de la casa, sufriendo de esta manera más atenuaciones.

# Bibliografía

- [1] J. Korhonen, “Introduction to 4G Mobile Communications”, Ed. Artech House, 2014, ISBN: 978-1-60807-699-4.
- [2] F. Khan, “LTE for 4G Mobile Broadband”, Ed. Cambridge, 2009, ISBN: 978-0-521-88221-7.
- [3] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, P. Berming, “3G Evolution, HSPA and LTE for Mobile Broadband”, Ed. Elsevier, 2007, ISBN: 978-0-12-372533-2.
- [4] A. Sancho Fernández, “Planificación de sistemas LTE en autopistas”, Trabajo de Fin de Grado, Universidad Autónoma de Madrid, Junio, 2015.
- [5] M. Anaya de Paz, B. Taha Ahmed, “UMTS Multi-Service Uplink Capacity and Interference Statistics of Femtocells”, Artículo, Wireless Personal Communication, 2012.
- [6] G. Horn, “3GPP Femtocells: Architecture and Protocols”, Qualcomm Incorporated, 2010.
- [7] D. Knisely, T. Yoshizawa, F. Favichia, “3GPP: Standardization of Femtocells”, WAP Journal, 2011.
- [8] T. Mersch, “LTE Femtocell Roadmap From Concept to Reality”, Radisys.
- [9] T. Xiang, “Efficient Mobility Management in LTE Femtocell Network”, Tesis Doctoral, Barcelona, España, 2014.
- [10] M. Motoki, N. Takahiro, H. Kojiro, “Development of Technology to Control Radio Signal Interference for LTE Femtocell Base Stations to Achieve Stable Communications Quality Anywhere”.

- [11] T. Badri, S. Rachid, M. Wahbi, “Handover Management Scheme in LTE Femtocells Networks”, paper, Universidad Kenitra, Marruecos, 2013.
- [12] A. Rath, S. Panwar, “Fast Handover in Cellular Networks with Femtocells”, Instituto Politécnico de Nueva York, 2012.
- [13] M.B. Ahmad, “Macro and Femto Network Aspects for Realistic LTE Usage Scenarios with Interference Management”, Proyecto de Fin de Máster, Estocolmo, Suecia, 2013.
- [14] Nafaa M. Shebani, Abdulati E. Mohammed, Mohammed A. Mosbah, Yousra A. Hassan, “Simulation and Analysis of Path Loss Models for WiMax Communication System”, Facultad de Ingeniería de Surman, Libia, 2013, ISBN: 978-0-9853483-3-5.



## **Anexo I: Lista de acrónimos**

ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
D-AMPS	<i>Digital Advanced Mobile Phone System</i>
FDD	<i>Frecuency Division Duplexing</i>
FDMA	<i>Frecuency Division Multiple Access</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
HNB	<i>Home Node B</i>
HNB-GW	<i>Home NodeB Gateway</i>
HMS	<i>Home Node B Management System</i>
HSPA	<i>High-Speed Packet Access</i>
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>

MCS	<i>Modulation Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
PDC	<i>Personal Digital Cellular</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SINR	<i>Signal to Interferences plus Noise Ratio</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

## Anexo II: Funciones implementadas

### A. *dimension\_piso*

```
function dim_piso= dimension_piso(Anchura_edificio,Long_piso)

Ancho_hab_norte=floor(Anchura_edificio/2); %m
Ancho_hab_sur=floor((Anchura_edificio-1)/2); %m
Ancho_pasillo=Anchura_edificio-Ancho_hab_norte-Ancho_hab_sur; %m

Long_hab_noreste=ceil(Long_piso/2); %m
Long_hab_noroeste=floor(Long_piso/2); %m

Long_hab_sur=Long_piso/3; %m

dim_piso= [ Ancho_hab_norte Long_hab_noroeste
            Ancho_hab_norte Long_hab_noreste
            Ancho_pasillo Long_piso
            Ancho_hab_sur Long_hab_sur
            Ancho_hab_sur Long_hab_sur
            Ancho_hab_sur Long_hab_sur ];
```

### B. *L\_totales*

```
function L_tot= L_totales(lambda,d,Kf,Kp,Shd)

%Perdidas en espacio libre
Lb=20*log10(4*pi/lambda);
Lfs_dB=Lb+20*log10(d);

%Perdidas por pared
Lp=6.9; %dB
Lp_tot=(10^(Lp/20))*Kp;
Lp_tot_dB=20*log10(Lp_tot);

if Kf~=0
```

```

%Perdidas por suelo
b=0.46; %valor óptimo
Lf_1=18; %dB perdidas por un suelo

aux=(Kf+2)/(Kf+1);
Lf=(Kf^(aux-b))*(10^(Lf_1/20));
Lf_dB=20*log10(Lf);

%Perdidas totales
L_tot=Lfs_dB+Lf_dB+Lp_tot_dB+Shd;
else
    L_tot=Lfs_dB+Lp_tot_dB+Shd;
end

```

### ***C. dBToNat y NatToDb***

```

function nat= dBtoNat(dB)
nat=10.^(dB./10);

function dB= NattodB(Nat)
dB=10*log10(Nat);

```

### ***D. L\_macroelda***

```

function L_mac = L_macroelda(d,f,model_param,hr,hb,Kf,Kp,Shd)
d0=100; %m
lambda = 0.3/f;
if d<100
    %Perdidas en espacio libre
    Lb=20*log10(4*pi/lambda);
    Lfs_dB=Lb+20*log10(d);
    L_mac_aux=Lfs_dB;
else
    if model_param==1
        a=4.6;
        b=0.0075;
        c=12.6;
        Xh=-10.8*log10(hr/2000);
    elseif model_param==2

```



```

a=4;
b=0.0065;
c=17.1;
Xh=-10.8*log10(hr/2000);
else
a=3.5;
b=0.005;
c=20;
Xh=-20*log10(hr/2000);
end
S=min(12,0.01*(d-100));
A=20*log10(4*pi*d0/lambda);
gamma=a-b*hb+c/hb;
Xf=6*log10(f*1000/2000); %f-->MHz
L_mac_aux=A+10*gamma*log10(d/d0)+Xf+Xh+S;
end
if Kp~=0
    %Perdidas por pared
    Lp=6.9; %dB
    Lp_tot=(10^(Lp/20))*Kp;
    Lp_tot_dB=20*log10(Lp_tot);
else
    Lp_tot_dB=0;
end
if Kf~=0
    %Perdidas por suelo
    b=0.46; %valor óptimo
    Lf_1=18; %dB perdidas por un suelo
    aux=(Kf+2)/(Kf+1);
    Lf=(Kf^(aux-b))*(10^(Lf_1/20));
    Lf_dB=20*log10(Lf);
    %Perdidas totales
    L_tot=Lf_dB+Lp_tot_dB+Shd;
else
    L_tot=Lp_tot_dB+Shd;
end
L_mac=L_tot+L_mac_aux;

```